



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MATERIÁLY POUŽÍVANÉ NA ŘEZNÉ NÁSTROJE K OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH VÝROBKŮ

MATERIALS USED FOR CUTTING TOOLS FOR METAL MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ TOMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN KALIVODA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Tomek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce :

Materiály používané na řezné nástroje k obrábění kovových výrobků

v anglickém jazyce:

Materials Used for Cutting Tools for Metal Machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Zákonitosti vývoje.
3. Současný stav.
4. Firmy produkující řezné nástroje.
5. Vzorový výběr nástroje (ů) pro výrobní proces dané součásti.
6. Technicko-ekonomické porovnání.
7. Recyklace v souladu s ekologií.
8. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Ucelená řešerše problematiky materiálů na řezné nástroje. Znalost významných firem produkujících nástroje. Praktická aplikace teoretických znalostí na technologický proces zadané součásti.

Seznam odborné literatury:


1. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
2. Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
4. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.
5. ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

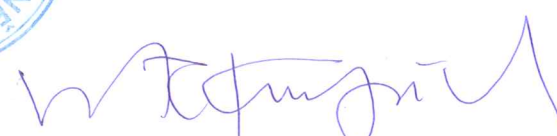
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.11.2013





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá řeznými materiály používaných pro výrobu břitových destiček a nástrojů pro obrábění. Cílem této práce je popsat jednotlivé materiály používané při obrábění, jejich základní charakteristiky, složení a výrobu. Součástí práce je i popis profilů předních světových výrobců produkující řezné nástroje. Na příkladu navrhnuté hřídele je provedena aplikace soustružnických nožů potřebných pro její obrobení a krátký popis výroby s grafickou ukázkou. Závěrečná část práce se věnuje vyhodnocení operace soustružení z hlediska využitých zdrojů v závislosti na ceně a času výroby a následnou recyklaci nástrojů s ukončenou životností.

Klíčová slova

karbid, obrábění, povlak, slinování, lisování

ABSTRACT

This thesis deals with cutting materials used for the production of inserts and tools for machining. The aim of this thesis is to describe the various materials used in machining, their basic characteristics, composition and production. The work also includes a description of profiles of leading world producers of cutting tools. On the example of the designed shaft is made application of turning tools needed for its machining and short description of its production with a graphic demonstration. The final part is devoted to the evaluation of the turning in terms of used resources depending on the cost, production time and subsequent recycling of end-of-life instruments.

Keywords

carbide, machining, coating, sintering, stamping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMEK, L. *Materiály používané na řezné nástroje k obrábění kovových výrobků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s, 22 s příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Materiály používané na řezné nástroje k obrábění kovových výrobků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21.5.2014

Datum

Lukáš Tomek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Milanu Kalivodovi z VUT za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

Za přínosné rady týkajících se výroby, návrhu hřídele a vůbec umožnění praktické části tímto děkuji Františku Matouškovi, mistrovi z výrobního závodu OHL ŽS a.s.

Děkuji i rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia a převážně při vypracování této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD.....	9
1 ZÁKONITOSTI VÝVOJE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ.....	10
1.1 Historický vývoj rychlořezných ocelí (RO).....	10
1.2 Historický vývoj slinutých karbidů (SK).....	11
1.3 Historický vývoj cermetů.....	13
1.4 Historický vývoj řezné keramiky.....	14
1.5 Historický vývoj supertvrdých materiálů	16
2 SOUČASNÝ STAV ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	17
2.1 Rychlořezné oceli	19
2.1.1 Chemické složení a vlastnosti.....	19
2.1.2 Výroba a zpracování	21
2.1.3 Povlakování	21
2.2 Slinuté karbidy	22
2.2.1 Výroba a zpracování	25
2.2.2 Nepovlakovné SK	29
2.2.3 Povlakované SK.....	29
2.3 Cermety.....	31
2.3.1 Výroba a zpracování	32
2.4 Řezná keramika.....	32
2.4.1 Výroba a zpracování	34
2.5 Supertvrde řezné materiály	36
2.5.1 Výroba a zpracování	36
3 VÝZNAMNÍ SVĚTOVÍ VÝROBCI ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	38
4 VÝBĚR NÁSTROJŮ PRO DANOU SOUČÁST	40
4.1. Postup výroby dané součásti.....	41
5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	43
5.1 Strojní časy t_{AS}	43
5.2 Spotřeba elektrické energie.....	43
5.3 Trvanlivosti použitých nástrojů	43
5.4 Podlahová plocha.....	45
5.5 Shrnutí.....	45
6 RECYKLACE	46

7	DISKUZE	47
	ZÁVĚR	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	53
	SEZNAM PŘÍLOH.....	54

ÚVOD

Řezné nástroje byly používány již v pravěku. Vůbec prvním řezným nástrojem byl kámen, který člověk postupem doby začal různými způsoby opracovávat. Dalo by se říct, že tímto krokem byla odstartována evoluce v obrábění. Člověk začal využívat tvrdší materiály, aby zdokonalil proces opracování materiálu.

Obrábění je v dnešní době nepostradatelnou částí celého novodobého průmyslu. Dnešní doba klade čím dál větší požadavky na řezné materiály a to zejména na cenu, rychlost obrábění a trvanlivost. Pro uspokojení těchto požadavků výrobci neustále mění složení a způsoby výroby, aby dosáhly lepších parametrů u nástrojů.

Mezi používané materiály patří:

- rychlořezné oceli,
- slinuté karbidy,
- cermety,
- řezná keramika,
- supertvrdé materiály.

Každý z uvedených materiálů má své specifické vlastnosti i požadavky pro použití ve výrobě. Samozřejmostí jsou i různé tvary nástrojů určené pro konkrétní operace při obrábění (obr. 1).

Důvodem výběru tohoto tématu bylo rozšíření znalostí v oblasti obrábění a ověření znalostí z teorie při aplikaci na skutečnou výrobu.



Obr. 1 Různé typy soustružnických nožů z SK.

1 ZÁKONITOSTI VÝVOJE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Řezné materiály jsou výsledkem intenzivních vývojových prací, které probíhaly již v období doby kamenné, kdy primitivní obyvatelé využívali úlomky kamene tzv. pazourky (obr. 1.1) k opracování ostatních známých materiálů. Hlavním přelomem v oblasti řezných materiálů nastal ve 20. století, zejména pak od jeho 30. let. Byly už známy materiály tvrdší než je kalená nástrojová ocel a to z oblasti přírodní materiálů jako jsou např. diamant a korund (Al_2O_3). Mohly být využity ve formě abraziva pro broušení kovů, ale v důsledku své nízké houževnatosti nebyly vhodné pro výrobu klasického řezného nástroje s definovatelnou geometrií. Operace řeznými nástroji, které například v roce 1900 vyžadovaly ještě 100 minut, a po nástupu slinutých karbidů na trh méně než jednu minutu. Vývoj řezných materiálů patří k těm faktorům, které významně přispěly k výkonnosti dnešního moderního průmyslu [1, 2].



Obr. 1.1 Pazourek [3].

1.1 Historický vývoj rychlořezných ocelí (RO)

Oceli jsou úzce spjaty s dějinami a vývojem lidstva. Patřily mezi poslední historický materiál, ale ze strany průmyslové revoluce, zvýšení produktivity práce i životní úrovně byl její význam velmi důležitý. Důležité místo v této skupině materiálů v oblasti obrábění téměř všech technických materiálů spolu oceli zaujímají tzv. nástrojové oceli. V minulosti se mnoho badatelů snažilo zvýšit výkonnost ocelí, ale do konce 19. století nebylo dosaženo pozitivního výsledku. Pokrok se dostavil až v roce 1868, kdy R.F. Mushet navrhl ocel se složením 2% C, 7% W a 2,5% Mn. Měla sice vysoký obsah uhlíku a wolframu, ale řezivost oceli zůstala stále nízká. Tato navrhnutá ocel se považuje za předchůdce dnešních rychlořezných ocelí. Později v roce 1900 navrhli R.W. Taylor a W. White ocel se složením 1,85% C, 8% W, 7,8% Cr, 0,3% Mn toto chemické složení bylo postupem doby změněno na 0,7% C, 19% W, 5,5% Cr a 0,3% Mn. Současně bylo zjištěno, že wolframové oceli mají stejnou tvrdost i za zvýšených pracovních teplot [1,10,11].

Další pokrokem, byl až objev J.A. Mathewse, který zvýšil přísadu vanadu na 1% a tím se zvýšila teplotní stálost oceli. Byla označena jako 18/4/1 nebo 18/1 a dlouho byla považována za základní typ rychlořezných ocelí. V roce 1912 byla vyzkoušena přísada 5-12% kobaltu což umožnilo zvýšit řezné rychlosti [1,11].



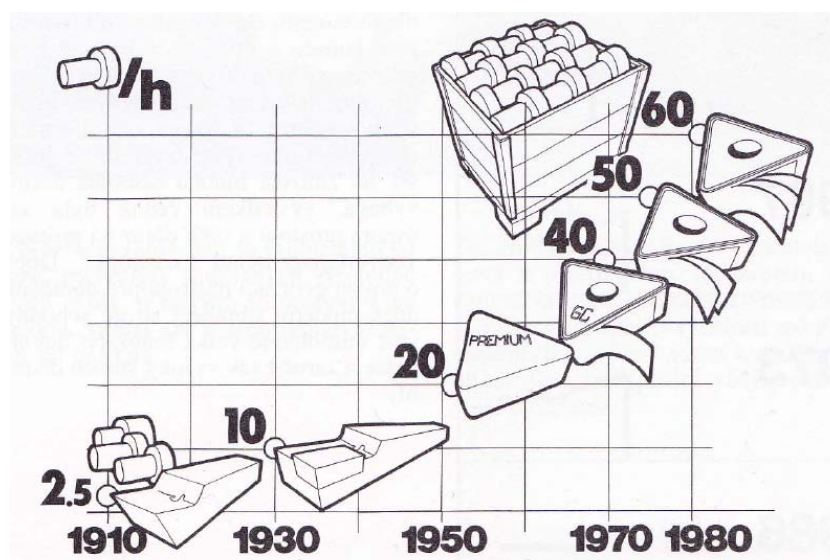
Obr. 1.1.1 Řezné nástroje z RO [12].

Po zavedení slinutých karbidů do technické praxe se zdálo, že rychlořezné oceli budou postupem času vytlačeny z trhu. Zkušenosti však ukázaly, že křehké slinuté karbidy mohou být nahrazeny houževnatějšími ocelmi, ale pouze v některých případech. Dalšími úpravami chemického složení, metalurgie, tepelného zpracování a povlakování se zvýšila jakost rychlořezných ocelí, takže si svoje významné postavení v oblasti materiálů pro řezné nástroje zachovaly [1,11].

Dnešním nejznámějším představitelem rychlořezných ocelí je tzv. RADECO. Pod tento název jsou zahrnuty všechny výrobky z HSS ocelí (obr. 1.1.1), zejména soustružnické nože [13].

1.2 Historický vývoj slinutých karbidů (SK)

Kvalitativní skok ve vývoji tvrdých materiálů byl zaznamenán až po využití elektrické obloukové pece zkonstruované Moissonem v Paříži v roce 1897, která umožnila zvýšit pracovní teploty procesu jejich výroby. V jeho laboratoři byly poprvé objeveny dva karbidy wolframu – W_2C (rok 1896) a WC (rok 1898). WC se rozkládá při teplotě 2 800 °C, W_2C má teplotu tavení 2750 °C. Oba karbidy mají vysokou tvrdost a mohou spolu vytvořit eutektickou slitinu s nižší teplotou tavení 2 525 °C. Tuto slitinu lze s jistými obtížemi odlévat a potom brousit do požadovaného tvaru pomocí diamantových kotoučů. Odlitky ale mají hrubozrnnou strukturu s mnoha defekty, snadno se porušují a nejsou vhodné pro řezné ani lisovací nástroje [1,2].



Obr. 1.2.1 Zvýšení počtu obrobeneých obrobků přechodem z HSS na SK [1].

K počátku minulého století se váže zjištění, že výborné řezné vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány přítomností velmi tvrdých karbidických částic (význam mají zejména částice WC) v kovové matici. Logickým vývojovým krokem se proto jevila možnost zvládnutí výroby řezných nástrojů z čistého karbidu wolframu. Materiál byl s potížemi připraven, ale v praxi se ukázal jako příliš křehký a tím pádem nepoužitelný na výrobu řezných nástrojů [1,2].

Na začátku 20. století se podařilo vyrobit žhavící vlákno z wolframového prášku. Tím začal rozvoj práškové metalurgie. K předním průkopníkům v oboru práškové metalurgie patří zejména Karl Schröter, který na začátku dvacátých let (1923) ohřál práškový wolfram smíchaný s uhlíkem a získal tak práškový karbid wolframu mikrometrické zrnitosti. Při vývoji zjistil, že pokud se takto vyrobený WC důkladně smíchá s malým množstvím kovu z podskupiny železo (kobalt, nikl z obsahem do 10% ve formě jemnozrnného prášku) a vylisovaný celek je ohříván na vysokou teplotu (nad 1 300 °C, ve vodíkové atmosféře), lze získat výrobek s nízkou pórovitostí, velmi vysokou tvrdostí a značnou pevností. Výsledný materiál je pak dokonale vytvrzen a skládá se z velmi rovnoměrně rozptýlených zrn WC, spojený do jednoho celku houževnatým kovem (brzy bylo zjištěno, že nejvýhodnějším pojivem je kobalt) [1,2].

Nově vyvinutý materiál umožnil řádové zvýšení řezných rychlostí ve srovnání s nástrojovými oceli, včetně rychlořezných „HSS“. Přechodem z nástrojových ocelí na slinutý karbid se podstatně zvýšil počet obrobků obrobených jedním břitem (obr. 1.2.1). Brzy se stal základem další důležité skupiny nástrojových materiálů – skupiny slinutých karbidů, která dnes zaujímá největší objem materiálů pro řezné nástroje. Německá metalurgická firma Krupp prorazila s výrobou SK typu WC-Co pod názvem WIDIA skládající se ze dvou německých slov **W**Ie – **D**IAmant (tato značka vyjadřovala nadšení vyplývající z objevení materiálu tvrdého „jako diamant“) [1,2].

Za významný mezník vývoje SK lze považovat jemnozrnné materiály, které se objevily na konci 60. let minulého století (obsahovaly jemnozrnný a rovnoměrná karbidická zrna). Střední velikost karbidických zrn prvních druhů jemnozrnných SK byla pod 1 μm, ve srovnání s 2 – 3 μm (někdy i více) u běžných druhů SK. Nejnovější druhy mají jemná zrna s velikostí pod 0,5 μm. K hlavním výhodám jemnozrnných karbidů patří jejich vyšší pevnost, které lze dosáhnout bez snížení tvrdosti [1,2].

V prvních aplikacích byl nový řezný nástroj vytvořen tak, že destičky ze slinutých karbidů byly pájeny do ocelových držáků. Změny v upevnění destičky v držáku (z pájeného spoje na konstrukci s mechanickým upínáním (obr. 1.2.2)) se objevily v polovině 50. let, v současnosti má již drtivá většina nástrojů mechanicky upínanou vyměnitelnou břitovou destičku „VBD“. Proto je přechod od pájených destiček na vyměnitelné destičky považován za „revoluci“ v novodobých dějinách řezných nástrojů. Jakou druhu revoluci lze považovat objev a rychlý rozvoj povlakovacích technologií [1,2].



Obr. 1.2.2 Přechod z pájeného spoje na mechanicky upínanou VBD.

1.3 Historický vývoj cermetů

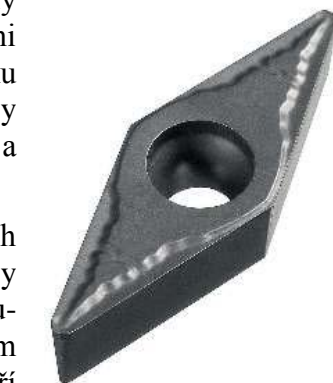
Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov „**CER**amics (keramika)“ a „**MET**al (kov)“ a měl by tak popisovat nástrojový materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují výhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu [2].

Cermety byly původně vyvinuty v rakouské firmě Plansee, která je dnes součástí firmy Ceratizit. Ačkoli první generace prakticky použitelných cermetů byla v USA k dispozici již v polovině 50. let minulého století, nevyvolaly tyto materiály velkou pozornost ani v USA ani v Evropě a to zejména v důsledku své nedostatečné houževnatosti. Naproti tomu byly ale velmi uznávány v Japonsku jako levný a lehce dostupný materiál pro řezné nástroje, protože většinou neobsahují wolfram ani kobalt. Jejich vývoj až na dnešní úroveň byl tedy prováděn hlavně v Japonsku, kde se staly velmi populárními a získávají zde stále větší uplatnění. Na konci 80. let tvořily cermety v japonském průmyslu více než jednu čtvrtinu všech užívaných břitových destiček (25-27% v roce 1988), což byl objem prakticky shodný s objemem destiček z povlakovaných slinutých karbidů [2].

U uživatelů, se cermety skutečně osvědčily jako řezný materiál vhodný pro dokončovací obrábění vysokými rychlostmi. Úspěšný vývoj a rozsah užití cermetů v Japonsku vzbudily v polovině 80. let nový zájem o tyto řezné materiály i v USA a Evropě (zde jsou rozšířeny zejména povlakované SK a počet uživatelů cermetů je odhadován na 1/3 japonských) [2].

Cermety na bázi TiC byly na trh uvedeny v polovině šedesátých let minulého století. Houževnaté cermety na bázi Ti (C, N) byly vynalezeny již v roce 1931, boom ve vývoji a produkci ale skutečně nastal až po systematickém výzkumu vedeném Kiefferem a jeho spolupracovníky v letech 1968÷1970, kteří poopravili předsudky vůči tvrdým částicím na bázi dusíku.

Od té doby bylo vyvinuto mnoho dalších druhů cermetů [2].



Obr. 1.3.1 VBD z cermetu [4].

Cermety (obr. 1.3.1) nabízejí výhody vyšších řezných rychlostí, ve srovnání s konvenčními SK, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC. Hlavní pozornost při výrobě cermetů byla věnována zvýšení pevnosti a odolnosti proti vydrolování. Tyto vlastnosti byly zlepšeny přidáním TaC a WC v sedmdesátých letech 20. století. Výsledkem bylo rozšíření oblasti užití na soustružení středními hodnotami posuvové rychlosti a lehké frézování [2].

V následujících generacích cermetů, bylo využito kombinace TiC a TiN. Postupem času byl podíl TiC postupně nahrazován nitridem titanu TiN. V polovině 70. let se zmenšila velikost zrn tvrdé fáze a vzrostla tvrdost materiálu. Došlo však ke zvýšení zbytkové pórovitosti (menší smáčivost TiN) a snížila se ohybová pevnost. Pečlivým řízením výrobního procesu, lze docílit eliminace pórů a tím se cermet typu TiC – TiN stane velmi výhodným řezným materiálem [2].

Protože tvrdá fáze cermetů vytváří při obrábění plochy s velmi nízkou drsností povrchu (v důsledku vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti k reakci s obráběným ocelovým materiálem - ve srovnání s WC), jsou cermety velmi rozšířenými řeznými materiály hlavně pro dokončovací obrábění [2].

1.4 Historický vývoj řezné keramiky

Z velkou pravděpodobností byl první keramický nástroj využíván člověkem již v době kamenné. Později byly využívány bloky pískovce, které měly velký obsah mikroskopických břitů SiO_2 . Byly používány např. pro ostření nožů, břitů, nůžek a další nástrojů [2].

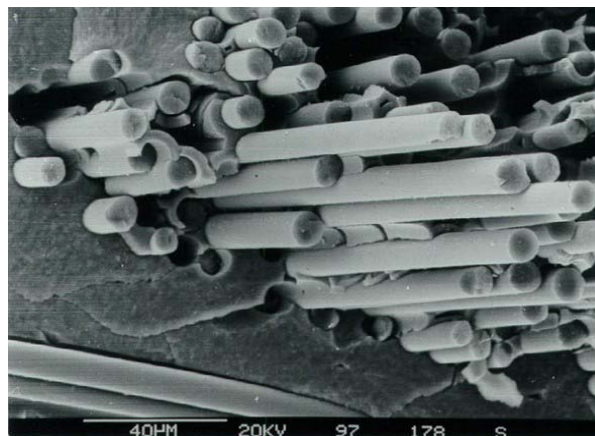
Počáteční úvahy o využití keramiky Al_2O_3 pro výrobu řezného nástroje byly poprvé diskutovány v Německu, v roce 1905 pod názvem Degussit. Patenty na keramické řezné nástroje byly vydány ve Velké Británii v roce 1912 a v Německu v roce 1913. Vůbec první komerčně dostupný keramický materiál na bázi Al_2O_3 . Byl vyvíjen z důvodu nahrazení SK typu WC-Co [2].



Obr. 1.4.1 Keramické destičky [6].

V USA byl první patent na keramický nástroj (na bázi německého materiálu Degussit) vydán v roce 1942, v Sovětském svazu byl první keramický nástroj (Microlite) vyvinut a vyroben v moskevském Ústavu chemické technologie v roce 1945 [2].

Na našem území se výzkumu a vývoji keramických řezných materiálů věnoval Výzkumný ústav minerálů v Turnově, kde byly první keramické břitové destičky laboratorně vyrobeny již v roce 1954 [2]. Vzhledem k vysoké křehkosti byly však aplikační možnosti prvních keramických materiálů omezeny pouze pro nepřerušované řezání a k jejich širšímu využití nedošlo též proto, že technologie výroby nebyla zdaleka propracována tak, aby z nich bylo možno zhotovit nástroj požadovaných a zejména opakovatelných vlastností. Keramický nástroj (obr. 1.4.1) začal v technologii obrábění výrazněji prosazovat až koncem 50. let a to na základě intenzivního výzkumu, který byl zaměřen na odstranění hlavních nedostatků keramiky (hrubozrnná struktura, nízká ohybová pevnost a nízká odolnost proti teplotním šokům). Dalším důvodem byl ekonomický tlak na zvýšení produktivity obráběcích operací a možnost nahradit v některých operacích slinuté karbidy. Surovinu pro výrobu keramiky jsou snadno dostupné, a relativně levné a nemají strategický význam jako wolfram a kobalt pro výrobu SK. [2].



Obr. 1.4.2 Průřez kompozitem s vyztužovacími vlákny z SiC (whiskery) [5].

První slinuté keramické materiály na bázi Al_2O_3 obsahovaly mimo základního oxidu hlinitého i malé množství (obvykle 1%) slinovacích přísad, např. MgO . Pevnost v ohybu se pohybovala v rozsahu 400-500 MPa, lomová houževnatost dosahovala hodnot 3-4 $\text{MPa m}^{1/2}$. Oxid hlinitý má nejvyšší termochemickou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení při obrábění vysokými řeznými rychlostmi, ale na druhou stranu má špatnou odolnost proti vydrolování ostří [2].

Keramiky typu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ byly vyvinuty koncem 50. let (materiály vyráběné metodou vysokoteplotního lisování až začátkem 70. let) a měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Ohybová pevnost vzrostla na 1000 MPa a lomová houževnatost na $4\text{-}5 \text{ MPa m}^{1/2}$, značně byla zvýšena odolnost proti vydrolování ostří. Proces výroby slinování byl postupem doby změněn z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování tzv. HIP, aby se snížila cena a zvýšila produktivita. Ze začátku byla odolnost proti vydrolování u HIP nižší než u vysokoteplotního lisování, ale postupem času byla zvýšena až na dnešní úroveň [2].

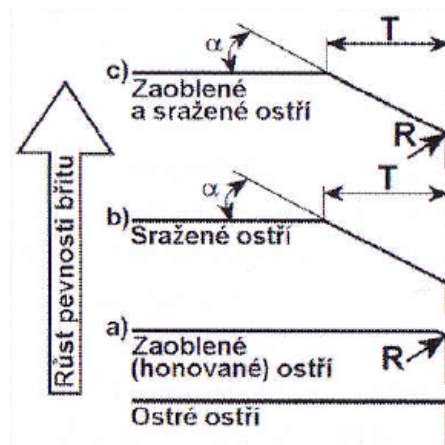
V polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny SiC (whiskery) (obr. 1.4.2), v rozsahu 20-30 obj.%.

Jejich ohybová pevnost je stejná jako u keramik typu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, lomová houževnatost je mnohem vyšší, kolem $9 \text{ MPa m}^{1/2}$. Hřbetní opotřebení je poněkud vyšší než u keramiky $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, protože SiC má při vyšších teplotách tendenci reagovat se slitinami železa [2].

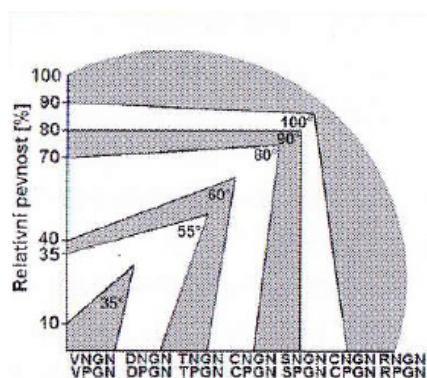
Přidáním vláken SiC značně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří, v důsledku mechanického zpevnění a vyšší odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde keramickým materiálům hrozí nebezpečí porušení právě v důsledku vydrolování a vylamování ostří [2].

Řezná keramika na bázi Si_3N_4 se začala vyrábět na začátku 80. let minulého století. Nitrid křemíku se vyrábí vysokoteplotním tlakovým slinováním a metodou HIP. Keramiky na bázi nitridu křemíku a oxidu hlinitého, obvykle ve složení $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ (nazývaný Sialon, název vznikl z chemických značek jednotlivých prvků: **Si-Al-O-N**) [2].

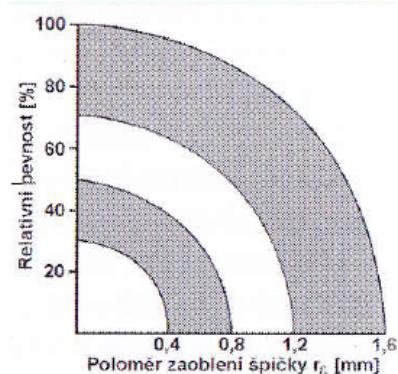
V období 1970-1980 přišli výrobci řezných nástrojů na to, jak zpevnit a chránit břit keramického nástroje (obr. 1.4.2). Tyto úpravy napomohly rozšíření aplikačních možností řezných nástrojů z oxidové keramiky (dokončovací obrábění šedých litin, ocelí s nízkým obsahem uhlíku a někdy niklových slitin). Na pevnost keramického nástroje má vliv i tvar břitové destičky s úhlem špičky (obr. 1.4.3) a poloměr zaoblení špičky (obr. 1.4.4) [2].



Obr. 1.4.2 Změna ostří keramického řezného nástroje [2].



Obr. 1.4.3 Relativní pevnost břitové destičky v závislosti na jejím tvaru roste v posloupnosti V-D-T-C-S-R, souvisí s úhlem špičky [2].



Obr. 1.4.4 Relativní pevnost břitové destičky roste s poloměrem zaoblení špičky [2].

1.5 Historický vývoj supertvrdých materiálů

Důležité je uvědomit si rozdíl mezi přírodním diamantem (obr. 1.5.1) a diamantem syntetickým (obr. 1.5.2). Diamant přírodní vznikl přibližně před 3 300 miliony let více než 150 km pod zemskou kůrou. Diamant syntetický byl uměle vytvořený pomocí metody HPHT v roce 1955. Byly vytvořeny dva typy syntetického diamantu a to, polykrystalický diamant „PKD“ a kubický nitrid bóru „KNB“, který byl vyroben až později na základě zkušeností s PKD.

S pojmem supertvrdé materiály se setkáváme již od roku 1955, kdy byl vyroben první syntetický diamant, který byl vědecky podložen. Byl vyroben vědci pracujícími v laboratoři firmy General Electric v USA. Oznámili, že vyrobili diamanty pomocí metody HPHT (**H**igh **P**reassure, **H**ight **T**emperature) a popsali definovaný a opakovatelný vědecky podložený proces, na který jim byla udělena patentová práva. Později se podařilo provést transformaci hexagonálního nitridu bóru na tvrdou, kubickou formu. Do roku 1970 se začaly vyrábět diamantové krystaly s kovovým povlakem pro zlepšení vazby v brousících koutoučích s pryskyřičným pojivem a začala komerční výroba kubického nitridu bóru [2,7].



Obr. 1.5.1 Přírodní diamant nebroušený [8].

Další významné období bylo mezi roky 1971-1975, kdy byl polykrystalický diamant aplikován na obrábění neželezných a nekovových materiálů a aplikace kubického nitridu bóru při obrábění kalených ocelí a tvrzených litin. V průběhu těchto let přesněji v roce 1973 byl ruskými vědci oznámen další pokrok, výroba diamantového povlaku z plynné fáze pomocí procesu CVD (Chemical Vapor Deposition) [2].

V roce 1986 byly vyrobeny nové druhy polykrystalického kubického nitridu bóru, které obsahují keramiku, a díky tomu se rozšířily aplikační možnosti. Na základě třídění podle velikosti a definování tvaru, zejména v oblasti řezání a broušení, jsou vyráběna diamantová zrna s vynikající krystalovou morfologií. Speciální povlakované diamantové krystaly zvyšují chemickou vazbu a upevnění zrn v nástrojích s kovovým pojivem [2].



Obr. 1.5.2 Krystaly syntetického diamantu pro řezné a brusné nástroje [9].

2 SOUČASNÝ STAV ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

V současné době je v důsledku celosvětového vývoje a výzkumu na trhu dostupný široký sortiment dodávaných řezných nástrojů. Jsou vyrobeny z různých materiálů, aby obrábění bylo ekonomické, ekologické a efektivní. V dnešní době se nepočítá s tím, že by byl vyvinut zcela nový druh řezného materiálu a proto se výrobci spíše zaměřují na zdokonalování současných řezných nástrojů a technologii jejich výroby, aby vyhověli konstrukčním požadavkům a požadavkům na přesnost [1,14,15].

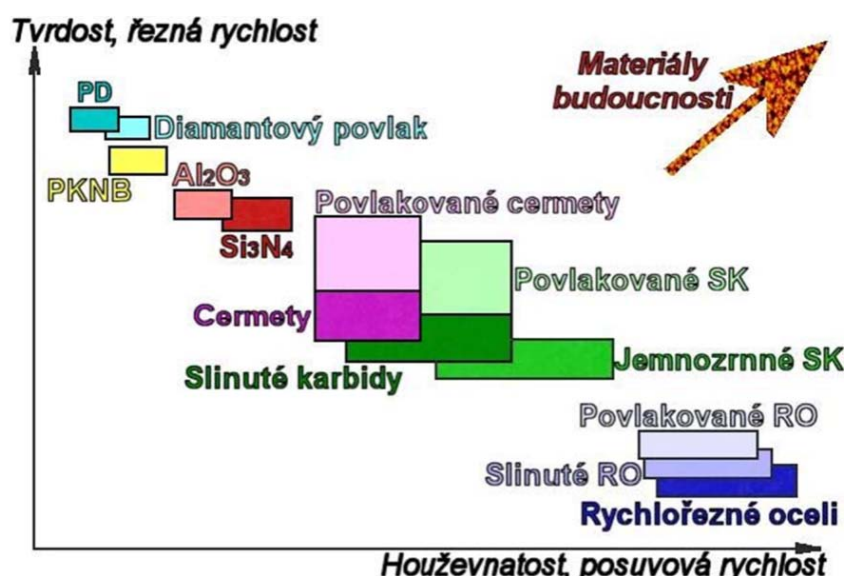
Ideální nástrojový materiál musí splňovat základní kritéria a to jsou [1]:

1. Houževnatost - odolnost proti totálnímu lomu.
2. Tvrdost a pevnost - odolnost vůči opotřebování bříty (abrasivní opotřebení) a plastické deformaci bříty.
3. Chemická stabilita - odolnost proti oxidaci a difuzi.
4. Chemická neutralita - řezný materiál nesmí reagovat s materiálem obrobku.
5. Materiál musí být chemicky stabilní - odolnost proti oxidaci a difuzi.
6. Dobrá teplotní odolnost proti zatížení tepelným šokem.

Materiál se všemi ideálními vlastnostmi se nepodařilo najít, ale pro výrobu se používají materiály, které splňují převažující část těchto požadavků (obr. 2.1). V současnosti je nej-používanější a nejdůležitější materiál SK a druhý HSS. Ostatní materiály nejsou tak rozšířené, ale v některých případech jsou nenahraditelné [15].

Obecné rozdělení současných nástrojových materiálů:

- rychlořezné oceli;
- slinuté karbidy;
- cermety;
- řezná keramika;
- supertvrdé materiály;
 - diamant;
 - kubický nitrid bóru.



Obr. 2.1 Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky [2].

Nástrojové materiály se dělí do 6 aplikačních skupin (obr. 2.3), které jsou vzájemně odlišeny písmenem a barvou podle normy ISO 513.

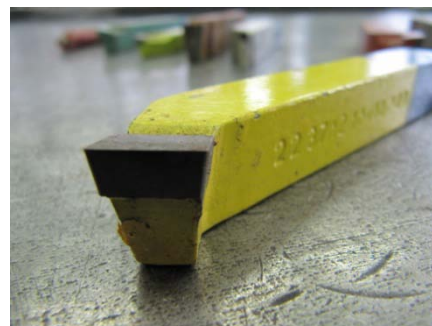
Rozdělení:

▪ Skupina P

Označuje se modrou barvou (viz. obr. 2.2) a je určena pro obrábění materiálu, které tvoří dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli, feritické ne-rezavějící oceli).

▪ Skupina M

Označuje se žlutou barvou. Má universální použití a je určena pro obrábění, které tvoří střední a delší třísku (lité oceli, astenitické a asteniticko-feritické oceli, tvárné litiny).



Obr. 2.2 Soustružnický nůž SK ubírací skupiny P.

▪ Skupina K

Označuje se červenou barvou. Je určena pro obrábění materiálů, které vytváří krátkou drobivou třísku (litiny, temperované litiny).

▪ Skupina N

Označuje se zelenou barvou a je určena k obrábění materiálů z neželezných kovů (hliník a další neželezné kovy a jejich slitiny).

▪ Skupina S

Označuje se hnědou barvou. Používá se na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, kobaltu a niklu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin.

▪ Skupina H

Označuje se šedou barvou. Je vhodná na obrábění kalených a vysoce tvrdých ocelí a tvrzených a kalených litin.

P Ocel	M Korozivzdorná ocel	K Litina
N Hliník	S Žárovzdorné slitiny	H Tvrzená ocel

Obr. 2.3 Skupiny obráběných materiálů [16].

2.1 Rychlořezné oceli

Označují se RO nebo HSS - High Speed Steels. Patří do větší skupiny nástrojových ocelí. Do této skupiny patří i další oceli, které podle tepelného zpracování a požadovaných vlastností mohou být použity pro výrobu řezných nástrojů (obr. 2.1.1) a jsou to oceli nelegované tzv. uhlíkové a nízkolegované tzv. slitinové. Oceli nelegované si zachovávají svou řezivost břitů do teploty 250°C a nízkolegované do teploty 300 °C. Pokud je tepelná zátěž břitů větší než tyto teploty, je nutné použít oceli vysokolegované tzv. rychlořezné, které dokážou krátkodobě odolávat teplotě od 600 do 650 °C. V tabulce (tab. 2.1.1) jsou uvedeny doporučené oceli pro výrobu nástrojů pro obrábění [15].

Oceli nelegované mají obsah uhlíku nad 0,8% a používají se na nástroje pro ruční a strojní obrábění. Tyto oceli jsou citlivé na vyšší teploty při kterých ztrácejí svou tvrdost. Nejčastěji se používá na obrábění dřeva z důvodu nízkého výkonu. Řezná rychlost je maximálně do 15m/min.

Oceli legované obsahují 1-15% legujících prvků. Jsou více odolné proti otupení a mají vyšší tvrdost a pevnost za tepla. Vyrábí se z nich nástroje s vyšším namáháním. Hlavními oblastmi použití jsou tvářecí nástroje, zápustky a jednoduché řezné nástroje (výhrubníky, protahováky, závitníky, pilové listy, dřevoobráběcí nástroje apod.)

Tabulka 2.1.1 Doporučené oceli pro řezné nástroje [11].

Oceli	Označení ČSN
Nelegované	19 083, 19 191, 19 221, 19 222, 19 255
Nízko a středně legované	19 420, 19 421, 19 422, 19 452, 19 463, 19 550, 19 571, 19 569, 19 710, 19 712, 19 733
Vysokolegované	19 436, 19 437, 19 438, 19 572, 19 573, 19 574, 19 581
Rychlořezné	19 800, 19 802, 19 810, 19 813, 19 820, 19 824, 19 829, 19 830, 19 850, 19 851, 19 852, 19 855, 19 856, 19 857, 19 858, 19 859, 19 860, 19 861

Ze všech nástrojových materiálů má RO nejvyšší houževnatost. Je zpracovatelná všemi běžnými technologiemi. Nástroje můžeme z RO vyrábět odléváním, kovááním, válcováním, třískovým obráběním. To může být pro některé výrobce rozhodující argument. Výhodou je i příznivá cena. Naopak nevýhodou je menší tvrdost a odolnost proti opotřebení, které navíc prudce klesají při teplotě přesahující 500 °C [15].

2.1.1 Chemické složení a vlastnosti

Rychlořezné oceli jsou samostatnou skupinou legovaných ocelí, pro kterou je v normě vyhrazena třída 19 8xx. Vysoké procento legujících prvků u RO zvyšuje tvrdost (60 až 68 HRC), pevnost v ohybu 2 700 až 4 500 MPa a popouštěcí teplotu do oblasti mezi 500 až 600 °C. U běžných ocelí je popouštěcí teplota cca 250 °C [11,15].

Z různé kombinace legur dosahujeme různých vlastností u rychlořezných ocelí. Mezi legující prvky patří zejména:

- **Wolfram (W)**

- množství se pohybuje od 6 do 18%;
- je základním legujícím prvkem;
- tvoří u RO tvrdé odolné karbidy a tím zvyšuje odolnost proti opotřebení.

- **Molybden (Mo)**

- množství se pohybuje od 0,7 do 10%;
- má obdobné vlastnosti jako wolfram, intenzita je však vyšší než u wolframu proto se využívá menší množství;
- zvyšuje houževnatost oceli;
- molybdenové oceli jsou citlivější na dodržování předepsaných podmínek tepelného zpracování.

- **Vanad (V)**

- množství od 1,3 do 4,3%;
- vytváří nejtvrdší karbidy ➔ zvyšuje odolnost proti opotřebení;
- výrazně klesá broušitelnost a houževnatost.

- **Kobalt (Co)**

- množství od 5 do 12%;
- zvyšuje odolnost oceli proti poklesu tvrdosti při vysokých teplotách;
- zabraňuje přehřátí při ohřevu na vysokou kalící teplotu a umožňuje lepší rozpouštění karbidů.

- **Chrom (Cr)**

- množství 4%;
- zajišťuje dostatečnou kalitelnost a prokalitelnost oceli.

Rychlořezné oceli se dělí na dva typy podle základního legujícího prvku a to na wolframové a molybdenové. Podle dalších legur jako je Co a V se dále dělí na oceli výkonné (označované HSS) a vysoce výkonné (označované HSS-E) [15].

Typy vyráběných ocelí je velké množství. Aby se oceli od sebe logicky odlišili, zavedla se norma EN ISO 4957 udávající obsah legujících prvků v pořadí W, Mo, V, Co. Například u oceli 19 852 bude značení dle normy HS-6-5-2-5. Další vybrané typy ocelí (tab. 2.1.2) [11].



Obr. 2.1.1 Soustružnické nože HSS kované [12].

Tabulka 2.1.2 Vybrané typy ocelí [11,15].

ČSN	EN ISO	W	Mo	V	Co	C	Vlastnosti, použití
19 824	HS 18-0-1	18,0	-	1,10	-	0,78	Soustružnické nože, frézy, výstružníky
19 820	HS 3-3-2	2,85	2,70	2,35	-	0,99	Úsporná ocel, komunální nářadí, pilové listy
19 830	HS 6-5-2	6,30	4,95	1,9	-	0,84	Nejpoužívanější ocel pro všechny druhy nástrojů
19 861	HS 10-4-3-10	9,5	3,55	3,25	10,0	1,28	Soustružnické nože a frézy pro nejvyšší výkony

2.1.2 Výroba a zpracování

Hutní výroba RO se nejčastěji provádí v elektrických obloukových pecích a následným odléváním do kokil. Vlivem vysokého obsahu uhlíku a legur má ocel při tuhnutí tendenci výrazně segregovat. Výrazné rozdíly ve struktuře se nedaří zcela potlačit ani následným tvářením za tepla. Výsledkem je řádkovitá struktura typická pro tvářenou rychlořeznou ocel. V 70 letech se proto pro výrobu nejkvalitnějších RO začala používat prášková metalurgie [11,15].

Při této technologii se prášek vyrábí rozprašováním taveniny rychlořezné oceli inertním plynem nebo vodou. Vyrobený prášek se dále zpracovává izostatickým lisováním při vysokých teplotách do polotovarů. Dalším krokem je kování nebo válcování za tepla do požadovaného tvaru. Existuje i další možnost výroby a to lisování prášku za studena a následným spékáním tímto způsobem se vyrábějí téměř na hotovo jednoduché nástroje (břitové destičky). Po tepelném zpracování se lisovaný tvar pouze dokončuje broušením [11,15].

Tepelné zpracování RO je velmi specifické v porovnání s jinými druhy ocelí. Typický je několikastupňový ohřev na velmi vysokou kalící teplotu (1000 až 1270 °C), přerušované kalení a několikanásobné popouštění při neobvykle vysoké teplotě (520 až 570 °C) [15].

2.1.3 Povlakování

Rychlořezné nástroje se často opatřují tvrdými povlaky o tloušťce 4 až 10 µm. K nanášení povlaků se používají výhradně PVD technologie (**Physical Vapour Deposition** – fyzikální napařování), protože pracovní teplota při nanášení je nižší než popouštěcí teplota rychlořezné oceli (podle některých údajů pod 600 °C, 350 °C nebo dokonce 180 °C). Metoda PVD vytváří tlaková zbytková napětí v povlaku, nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu a je schopna povlakovat i ostré hrany, na druhé straně vyžaduje mnohem důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním (odmašťování, čištění) a má směrový účinek (plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu, by bez neustálého pohybu vzorku zůstaly zcela bez povlaku). Výhody použití povlakovaných nástrojů jsou v menší spotřebě chladicí kapaliny (v některých případech se chlazení nepoužívá vůbec), zlepšení řezných podmínek, zvýšené trvanlivosti ostří nástroje, řezivosti nástroje a přesnosti obrábění [10,15].

2.2 Slinuté karbidy

Slinutý karbid je řezným materiálem, který obsahuje tvrdé částice karbidu, které jsou vázány kovovým pojivem. Jedná se o výhodnou kombinaci vlastností a v současné době jsou slinuté karbidy nejdůležitějším nástrojovým materiálem, speciálně ve vyšších rychlostech. Typickou vlastností slinutých karbidů je vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení až do teplot cca 900 °C a vysoká pevnost v tlaku. Nedostatkem je nižší houževnatost (ve srovnání s rychlořeznými ocelmi) a malá tepelná vodivost. Slinuté karbidy jsou dnes k mání buď ve formě břitových destiček určených pro pájení na tělo nástroje nebo ve formě vyměnitelných břitových destiček „VBD“, které jsou upevněny jedním z několika druhů mechanického upínání. Na trhu se čím dál častěji začínají objevovat monolitní SK nástroje (obr. 2.2.1) (pod označením Tiny Turn) [1,15].



Obr. 2.2.1 Monolitní SK nože Tiny Turn [17].

Základní vlastnosti slinutých karbidů [19]:

- vysoká tvrdost (88 až 98 HRA), malá pevnost v ohybu;
- velká odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách;
- stálá tvrdost do teplot 700 až 1000 °C;
- dobré mechanické a fyzikální vlastnosti (pevnost v tlaku, odolnost proti korozi, malý součinitel teplotní roztažnosti, vysoká měrná hmotnost);
- špatná tepelná a elektrická vodivost.

Slinutý karbid je produktem práškové metalurgie, který se vyrábí v první řadě z různých karbidů a z kovového pojiva. Mezi nejdůležitější karbidy patří:

- **Karbid wolframu (WC)**

WC je vůbec prvním karbidem, který byl využit na výrobu SK. Dnes je základem pro výrobu všech druhů slinutých karbidů (povlakovaných, nepovlakovaných). Má hexagonální krystalovou mřížku, která vyváří snadno rozpoznatelná zrna trojúhelníkového nebo pravoúhlého tvaru. Důležitý krok k výrobě karbidu wolframu je výroba wolframového prášku z čistého wolframu (obr. 2.2.3).

Velmi důležité při výrobě je sledovat parametr zrnitosti čistého práškového wolframu, který nejvíce ovlivňuje velikost zrna WC. Prášek je v dalším kroku smíchán s pevným uhlíkem (ve formě sazí nebo grafitu) ohříván v atmosféře nauhličujících plynů při teplotě asi 1300-2400 °C (čím nižší je teplota, tím menší je zrnitost WC) [2,15].

Z praktického pohledu je karbid wolframu je vyráběn za sucha smícháním čistého wolframového prášku s určitým množstvím uhlíku (saze, grafit). Směs se napěchuje do kontejnerů nebo se slisuje do formy briket a založí se do vakuové indukční pece (elektrické odporové pece). Atmosféru pece tvoří vodík. Proces karbidizace trvá zhruba 1-2 hodiny. Po ukončení spékání se kousky drtí a melou [2].

Karbid wolframu u SK ovlivňuje zejména tyto vlastnosti [15,19]:

- zajišťuje odolnost proti abrasivnímu opotřebení;
- zvyšuje pevnost břitu;
- ovlivňuje tvrdost a chemickou stálost.



Obr. 2.2.3 Šupinky čistého wolframu [18].

- **Karbid titanu (TiC)**

Titan krystalizuje v hexagonální a v kubické prostorově centrované struktuře při teplotách nad 900 °C. Titan je stříbrolesklý kov. Vyskytuje se téměř v každém nerostu v malém množství. Nejběžnější minerálem pro výrobu je rutil např. TiO_2 (59,94% Ti+40,06% O_2), který se vyskytuje na černých krystalech hematitu Fe_2O_3 ve formě jehlicovitých zlatožlutých krystalů (obr. 2.2.4) [2].

Karbid titanu je vyráběn za vysokých teplot (cca 2000-2200 °C.) redukcí a nauhličováním směsi vysoce čistého TiO_2 a sazí nebo grafitového prášku v indukční peci, ve vakuu nebo vodíkové atmosféře. U vodíkové atmosféry se nemusím snažit zabránit přístupu vzduchu z okolí do pracovního prostoru pece (jednodušší konstrukce pece), vakuová metoda je naproti tomu výhodnější z toho hlediska, že výsledný TiC obsahuje vyšší množství vázaného uhlíku a neobsahuje dusík [2].

Karbid titanu u SK ovlivňuje zejména tyto vlastnosti [15,19]:

- zvyšuje odolnost proti vymílání čela;
- zmenšuje odolnost proti otěru;
- s rostoucím obsahem zvyšuje tvrdost a stálost za vysokých teplot (lépe jak WC);
- zvyšuje se křehkost a snižuje se ohybová pevnost s rostoucí tvrdostí.



Obr. 2.2.4 Krystalky TiO_2 na hematitu Fe_2O_3 [20].

• Karbid tantalu (TaC) a niobu (NbC)

Karbid tantalu je vyráběn současnou redukcí a nauhličováním oxidů kovů uhlíkem. V oxidu tantalečném (Ta_2O_5) je vždy obsažen oxid niobičný (Nb_2O_5), v důsledku jejich fyzikálního spojení v rudě. Odpovídající množství oxidu je důkladně promícháno s čistými sazemi nebo grafitovým práškem a ohříváno na teplotu 1 400 - 1 800 °C ve vodíkové atmosféře nebo ve vakuu.



Obr. 2.2.5 Tantalová ruda [21].

Niob, který je vždy obsažen v tantalové rudě (obr. 2.2.5) a jeho odstranění by bylo velmi nákladné, počítá s tím, že niob bude ve struktuře obsažen. Výsledný karbid je často označován jako TaC.NbC. Niob má poloviční relativní atomovou hmotnost, díky tomu dokáže vytvořit dvojnásobně více karbidů než tantal. Niob výrazně neovlivňuje vlastnosti SK ani za vysokých teplot, tak jeho množství obsažené v tantalu (10 – 30%) se považuje za akceptovatelné.

Karbid tantalu u SK ovlivňuje zejména tyto vlastnosti [15,19]:

- zvyšuje odolnost proti opotřebení za vysokých teplot ve spojení s WC;
- zvyšuje houževnatost a mechanickou pevnost břitů;
- zvyšuje odolnost proti tepelným šokům;
- zjemňuje strukturu a tím i odolnost vůči oxidaci a otěru.

Při výrobě SK se využívá ještě dalších karbidů, jako je karbid vanadu (VC) a chromu (Cr_3C_2). Karbid vanadu se vyrábí stejně jako karbid tantalu i za stejných teplot. Chrom se často vyskytuje s rudami železa např. jako ruda chromit ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, obr. 2.2.6) a vanad se vyskytuje až v 60 minerálech např. ve vanadinitu ($\text{Pb}_5(\text{VO}_4)$, obr. 2.2.7). Oba karbidy jsou velmi dobrými inhibitory růstu zrna, mají lepší účinek než TaC.NbC. Pokud jsou u SK použity oba karbidy vzájemně působí synergeticky na potlačení růstu zrna [2].

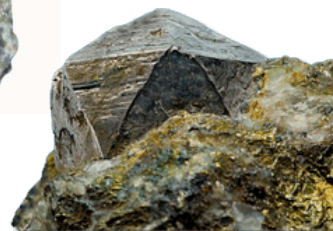
Jako pojivo se u SK používá kobalt (Co), který se vyskytuje např. v kobaltitu (CoAsS , obr. 2.2.8). Výše uvedené karbidy mohou být i bez kovového pojiva, protože jsou v navzájem rozpustné, ale na druhou stranu přidáním kobaltu jako pojiva se dosahuje vyšší houževnatosti, ohybové pevnosti, ale na druhou stranu klesá tvrdost. Vyrábí se např. z oxidu redukcí uhlíkem ve vodíkové atmosféře při teplotách 350 – 500 °C. Kobalt je méně reaktivní ve vlhkém vzduchu a nekoroduje (kobaltový prášek) oproti železu [1,2,15].



Obr. 2.2.7 Vanadinit [22].



Obr. 2.2.6 Chromit [23].



Obr. 2.2.8 Kobaltit [24].

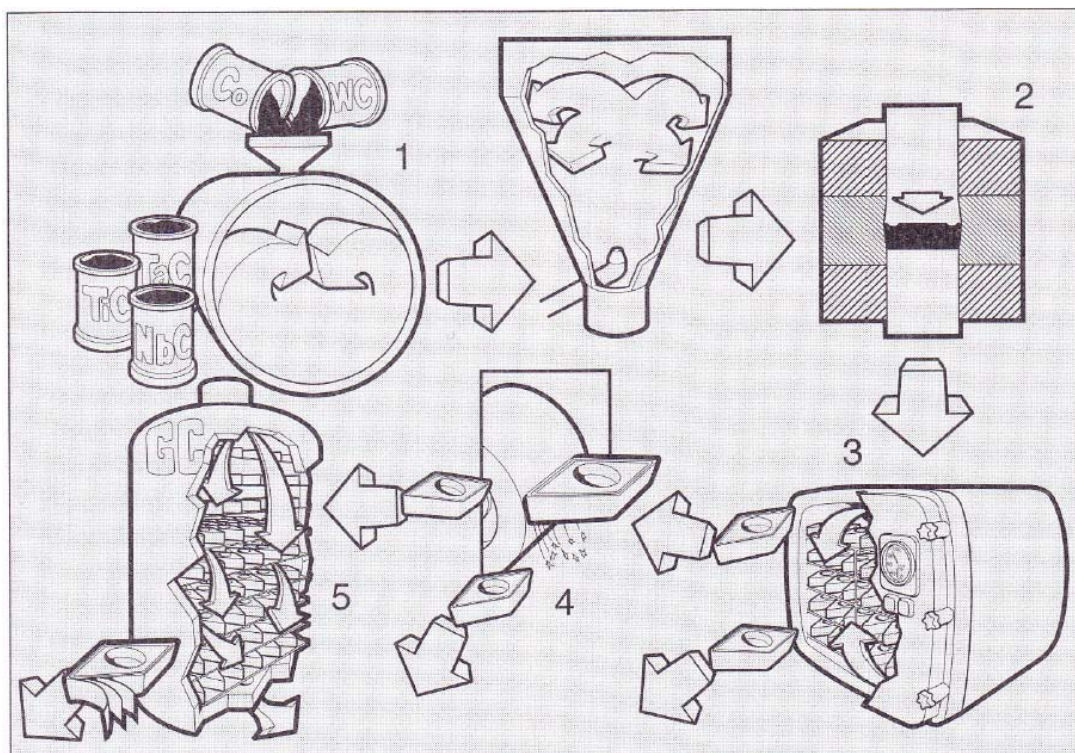
2.2.1 Výroba a zpracování

Výroba SK je velmi složitý proces, který obsahuje řadu speciálních technologií a postupů, které by přesáhly možnosti této práce a proto bude popsána pouze obecně.

Výroba slinutých karbidů představuje typickou metodu oboru, nazývaného prášková metalurgie. Podstatou částí procesu výroby slinutých karbidů je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, nejčastěji kobaltu, a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Tím vzniká kompaktní materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká poměrně vysokou pevností (zejména v tlaku, současné produkty předních výrobců i pevností v ohybu), protože jeho struktura je tvořena pevnou kostrou pojícího kovu, která obklopuje zrna relativně křehkých karbidů [2].

Výroba se obecně skládá z následujících základních operací (obr. 2.2.1.1):

- výroba práškového wolframu, pojiva a dalších karbidů;
- příprava směsi uvedených prášků (míchání, homogenizace, mletí, sušení);
- formování směsi (lisování, vytlačování);
- slinování (teploty 1 350 - 1 650 °C);
- případné dobroušení tvaru;
- povlakování (můžou být i nepovlakované).



Obr. 2.2.1.1 Základní postup výroby: 1. mletí prášku za mokra a následné sušení; 2. lisování směsi prášku; 3. slinování; 4. dokončování výsledného tvaru broušením; 5. povlakování [1].

Příprava prášků

Nejdříve jsou vyrobeny karbidy wolframu, titanu a další prvků, které se využívají k výrobě SK jejich výroba je popsána výše. Následuje míchání práškových karbidů v předem daném množství s práškovým pojivem (kobaltem). Dalším časově náročnou etapou je mletí za mokra v kulových mlýnech (viz obr. 2.2.1.2) a následné sušení.



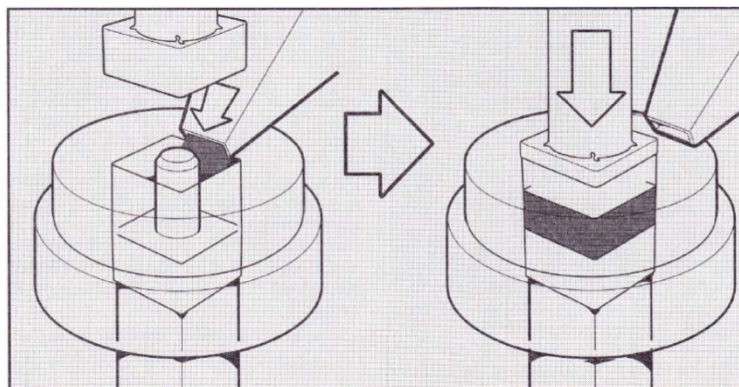
Obr. 2.2.1.2 Kulový mlýn [25].

Lisování

Směs karbidických prášku se dále zpracovává do požadovaného tvaru za pomoci:

- **Izostatického lisování za studena (CIP - Cold Isostatic Pressing)**

Prášková směs umístěna do pružné formy z latexu nebo silikonového kaučuku, která se následně uzavře, aby se do směsi nedostalo pracovní médium (tlaková kapalina). Působením rovnoměrného tlaku (viz obr. 2.2.1.3) dosáhnout vysoké hustoty a homogenity výlisku, a to i u prášků, které jsou jinak obtížně lisovatelné. Máme dvě různé varianty izostatického lisování za studena, které se liší způsobem vyvíjení tlaku mechanickým tlakem pístu („dry-bag“, suchá metoda, která je využívána pro malé výlisky a lze plně automatizovat) nebo hydraulickým tlakem kapaliny („wet-bag, mokrá metoda, která je využívána pro rozměrné součásti a není ji možné plně automatizovat) [2,26].



Obr. 2.2.1.3 Lisování polotovaru z karbidového prášku s pojivem [1].

U obou těchto metod má největší vliv na vlastnosti výlisku etapa snižování tlaku. Na začátku se tlak snižuje velice rychle, ale v momentě kdy se začne výlisk oddělovat od formy musí být rychlost snížena, aby bylo zajištěno úplné oddělení. Následně se rychlost může zase zvýšit až do okamžiku, kdy se začne z výlisku uvolňovat stlačený vzduch (rychlé snížení tlaku by mohlo vést ke vzniku trhlin) [2].

- **Vysokoteplotního izostatického lisování (HIP-Hot Isostatic Pressing)**

U této metody v průběhu jednoho cyklu dochází v tlakové nádobě nejen k lisování, ale i ke spékání součásti (za vysokých teplot a tlaků). Prášek není umístěn v pryžovém pouzdru, ale většinou se užívá formy kovových hladkých válcových pouzder nebo i pouzder z plechů různě vytvarovaných [2,26].

Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu, která se blíží teoretické hodnotě, s minimálním objemem pórů a jiných vad a při aplikacích pro řezné nástroje proto dosahují nejvyšších hodnot trvanlivosti [2].

- **Vytlačování**

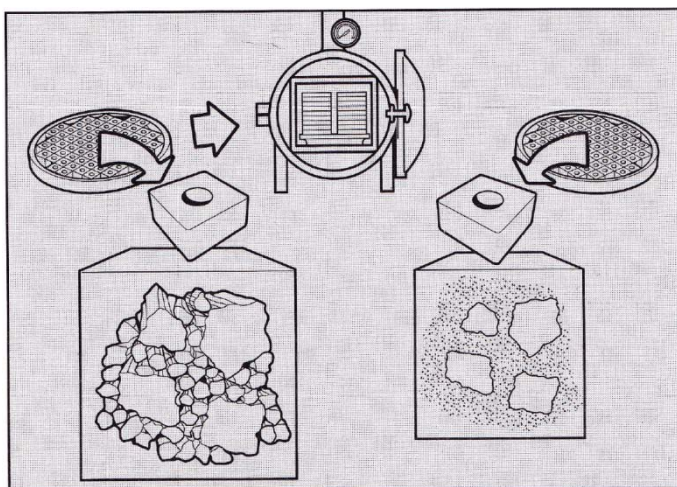
Technologie vytlačování se používá na výrobu řezných nástrojů za pomoci moderního zařízení, které dokáže vytlačovat polotovary ze slinutých karbidů určených pro výrobu monolitních vrtáků, fréz, i jiných řezných nástrojů, včetně tyčí kruhového průřezu až do průměru 50 mm [2].

Lisováním získá polotovar pouze tvar, ale ne přesný rozměr. Porezita tohoto výlisku činí cca 50 objemových procent. Tato porezita se při slinování odstraní. Rozměr šířky, výšky a hloubky polotovaru se smrští o cca 17 až 20%. Tento úbytek rozměru musí být při konstrukci lisovacích strojů zohledněn, protože vyměnitelná destička musí mít po stránce rozměru vysokou kvalitu. V některých případech jsou ještě výlisky dokončovány obráběním [1,15].

Slinování

V průběhu slinování (viz obr. 2.2.1.4) je vylisované těleso umístěno do slinovací pece, kde je ohříváno a následně ochlazováno za řízených podmínek, v atmosféře H_2 , Ar nebo ve vakuu. Celý proces může být rozdělen na části, předslinování (odstranění plastifikátoru bez jakékoliv změny tvaru nebo chemického složení tělesa při teplotách $700 \div 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) a slinování. Z technologického hlediska mohou být tyto dvě části spojeny do jedné operace [2].

Proces slinování musí být řízen naprosto přesně (teplota, čas), aby vyráběný slinutý karbid byl dostatečně zhutněn a dosáhl po ukončení procesu požadovanou mikrostrukturu a má očekávané mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Kontrola obsahu uhlíku je důležitá nejen při slinování, ale také již při přípravě materiálu ke slinování a při následném povlakování. Přítomnost uhlíku v podobě grafitu nebo křehké eta-fáze má přímý vliv na odolnost proti opotřebení a houževnatost VBD ze slinutých karbidů [1,2].



Obr. 2.2.1.4 Průběh slinování [1].

Slinování vyžaduje především dodržení přesné teploty, doby průběhu a odpovídající atmosféry pracovního prostředí, které zaručí přeměnu porézního výlisku z prášku na dokonalý řezný materiál. Reakce, která při procesu slinování probíhá, se nazývá tavné slinování. Při dosažení nejvyšší teploty 1 400 až 1 600 °C se kovové pojivo roztaví a rozpustí se v něm značné množství karbidů. Pojivová fáze obsahuje zejména kobalt (slouží ke spojení zrn tvrdé fáze, zvýší houževnatost materiálu) a malé množství rozpuštěného wolframu. Část karbidových zrn, které nejsou rozpuštěny v tavenině, má sklon k silnému zvětšování zrna na úkor jiných zrn karbidů. Se zvětšováním zrna je spojena současně i změna tvaru karbidových zrn [1,2].



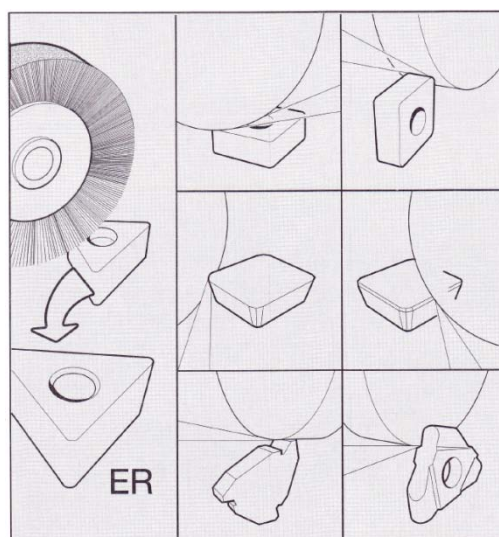
Obr. 2.2.1.6 VBD nepovlakovaná s daným utvařečem.

Obsahuje-li směs slinutého karbidu mimo karbidu wolframu ještě karbidy titanu, tantalu nebo niobu, dochází při slinování k odpovídajícím změnám reakce. Při slinování se tyto karbidy rozpouštějí jeden do druhého, dodatečně rozpouštějí ještě i část karbidu wolframu a vytvářejí tak směsný karbid, který se tvarem zrna liší od čistého wolframu. Současně s probíhajícími reakcemi, které mění strukturu, se slinutý karbid smršťuje a zbavuje se pórovitosti. Při ochlazení je největší část rozpuštěných karbidů z kovového pojiva vyloučena. Většina slinutých karbidů dosahuje tuhého stavu při cca 1 300 °C [1].

Finální úprava VBD

Konečnou podobu může destička získat broušením (záleží na oblasti použití). Zejména u destiček pro frézování, které mají velké požadavky na rovinnost dosedacích ploch (obr. 2.2.1.5). Naopak destičky pro soustružení jsou přesně vylisovány za pomoci lisovacích nástrojů, které v sobě obsahují tvar utvařeče a fazetky (obr. 2.2.1.6), takže není zapotřebí broušení [1].

V současné době se většina řezných nástrojů (pro rozšíření oblasti použití a zvýšení užitných vlastností) povlakuje.



Obr. 2.2.1.5 Konečné úpravy VBD [1].

2.2.2 Nepovlakovné SK

Nepovlakované slinuté karbidy jsou rozdělovány do šesti skupin, které jsou označeny barvou a písmenem (P, M, K, N, S, H). Vzhledem ke svému složení se nepovlakované karbidy někdy též označovány jako jednokarbidové (K), dvojkarbidové (P) a vícekarbidové (M). Jednotlivé skupiny jsou rozepsány v příloze 3 [2].

- Skupina K – WC + Co + (TaC.NbC).
- Skupina P – WC + TiC + Co + (TaC.NbC).
- Skupina M – WC + TiC + TaC.NbC + Co.



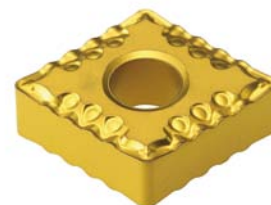
Obr. 2.2.2.1 Nepovlakovaný SK vnitřní stranový

Slinuté karbidy prodělaly dlouhý vývoj, v jehož průběhu se produktivita obrábění podstatně zvýšila. Povlakované SK převzaly vedoucí roli a v převážné míře vytlačily slinuté karbidy nepovlakované. Nepovlakované SK (obr. 2.2.2.1) jsou v současné době využívány pro obrábění hliníku [1].

2.2.3 Povlakované SK

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál (původně běžný SK typu K, P nebo M) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení. Povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě. Povlakovaný materiál získá po povlakování svou specifickou barvu (např. TiN má zlatavou barvu (viz. obr. 2.2.2.1)). V současné době se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky, podle různých způsobů a podmínek obrábění. Různé materiály povlaků mají různé fyzikální i mechanické vlastnosti (tvrdost, koeficient tření), které významně ovlivňují jejich odolnost proti opotřebení při aplikacích pro řezné nástroje [1,27].

Prakticky na všechny materiály pro řezné nástroje (slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, v menším rozsahu i kubický nitrid boru) lze dnes nanést povrchovou vrstvu tvrdých a otěruvzdorných povlaků.



Vývojové stupně povlakovaných SK [2,27]:

Obr. 2.2.3.1 Povlakovaná VBD [28].

1. generace

- jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC);
- tloušťka povlaku až 6 μm ;
- špatná soudržnost podkladu s povlakem (rychle docházelo k odlupování povlaku-znehodnocení nástroje).

2. generace:

- jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN);
- tloušťka 7 až 10 μm ;
- bez eta-karbidu na přechodu podklad - povlak (nedocházelo k odlupování povlaku).

3. generace:

- vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami);

- řazení odpovídá vlastnostem (první vrstva bude mít lepší přilnavost na podklad- nižší odolnost proti opotřebení a poslední nemusí mít dobrou přilnavost, ale vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení;
- nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí od podkladu k povrchu: $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$, TiC-TiN , TiC-TiCN-TiN , $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$, $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$.

4. generace:

- speciální vícevrstvý povlak velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev, s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami;
- používají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace;
- schopnost odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu.

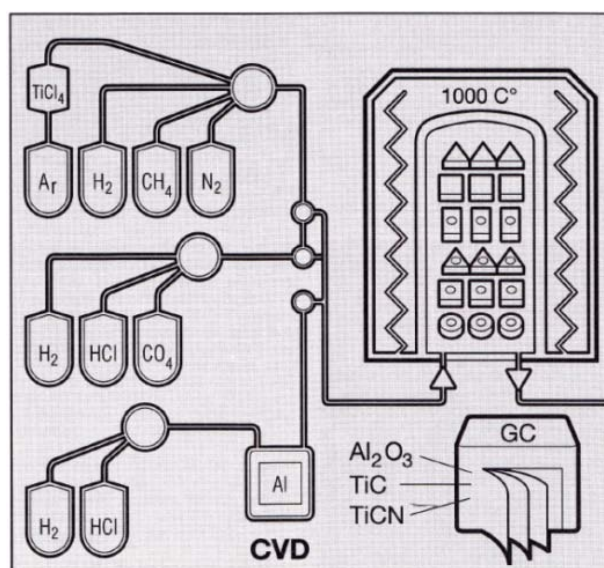
Povlaku na slinutých karbidech i na ostatních řezných materiálech (HSS, cermet, řezná keramika, KNB, PKD) se dosahuje za pomoci dvou konvenčních technologií. Jsou to metody PVD (Physical Vapor Deposition) a CVD (Chemical Vapor Deposition).

- **Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování)**

Metoda PVD je charakteristická nízkými teplotami (pod $500\text{ }^{\circ}\text{C}$). PVD jsou povlaky vytvářeny za sníženého tlaku ($0,1\div 1,0\text{ Pa}$) kondenzací částic (atomů, případně shluků atomů), které jsou uvolňovány ze zdroje částic (terčů, targetů) fyzikálními metodami - rozprašováním (urychlenými ionty Ar vytvářenými ve zkříženém elektromagnetickém poli) nebo odpařováním (indukčně, nízkonapětovým obloukem, laserem nebo elektronovým paprskem), některé metody využívají i klasický odporový ohřev. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (např. Ar a N_2) a záporným předpětím (řádově ve stovkách voltů) jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku ($1\div 5\text{ }\mu\text{m}$, v atmosféře obsahující dusík se tvoří povlak TiN). K nevýhodám metod PVD patří požadavek pohybovat povlakovanými předměty (kvůli rovnoměrnému povlakování. Podrobněji popsáno v příloze 1 [2].

- **Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování)**

Metoda CVD probíhá za vysokých teplot ($1000\text{ -}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Při povlakování metodou CVD je povlakovaný předmět ohřát ve směsi plynů, (např. H_2 , CO_4 , Ar, H_2 , atd.), které na jeho povrchu reagují, a tím vytvářejí pevnou vrstvu požadované látky (např. Al_2O_3 , TiC, TiCN při $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, (obr. 2.2.3.2)). Základní nevýhodou je udržování předmětu na teplotě nutné pro rovnovážnou chemickou reakci, při které vzniká povlakovaná vrstva. Podrobněji popsáno v příloze 2 [27].



Obr. 2.2.3.2 CVD metoda [1].

2.3 Cermety

Cermety vznikly zejména kvůli úspoře drahých materiálů (W, Co), které jsou používány pro výrobu SK. U cermetu je karbid wolframu úplně nebo z větší části nahrazen TiC, karbonitridem titanu (TiCN) nebo nitridem titanu (TiN). Jako pojivo se používá Co nebo nikl (Ni, příloha 4). Jsou vhodné pro jemné obrábění a dokončování ocelí a ocelolitin a do určité míry i litin. Největšího rozšíření dosáhly cermety v Japonsku a USA.

Základní vlastnosti cermetů [1,2]:

- odolnost proti opotřebení čela i hřbetu;
- vysoká pevnost a tvrdost za tepla;
- chemická stabilita;
- nižší houževnatost a sklon oxidačnímu opotřebení;
- špatná odolnost proti teplotním rázům.



Obr. 2.3.1 Molybdenit [28].

Cermet je produktem práškové metalurgie, který se vyrábí v první řadě z různých karbidů, nitridů a z kovového pojiva. Téměř všechny výchozí materiály pro výrobu SK jsou použity i pro výrobu cermetu (wolfram, titan, tantal a niob, chrom a vanad – kapitola 2.2) Mezi ostatní karbidy a nitridy patří:

- **Nitrid titanu (TiN)**

Pro výrobu prášku TiN lze použít mnoho různých metod, některé z nich produkují čistější materiály ve vztahu ke stopovým prvkům N₂ a O₂ [2]:

- Nitridace oxidu titaničitého (TiO₂) za přítomnosti uhlíku pomocí dusíku nebo čpavku, při teplotách 1200-1400 °C. Jedná se o vícestupňovou reakci a výsledný produkt může obsahovat velké množství stopových prvků N₂ a O₂.
- Nitridace prášků kovového titanu nebo hydridu titanu pomocí dusíku nebo čpavku, při teplotách 1200-1400 °C. Pro zajištění úplné reakce musí být proces realizován při tlaku asi 100 MPa, výsledný produkt má vysokou čistotu.
- Reakce chloridu (TiCl₄) nebo oxichloridu (TiOCl₂) titanu se čpavkem, která je založena na tepelném rozkladu mezifázových halogenových sloučenin.

- **Karbid molybdenu (Mo₂C)**

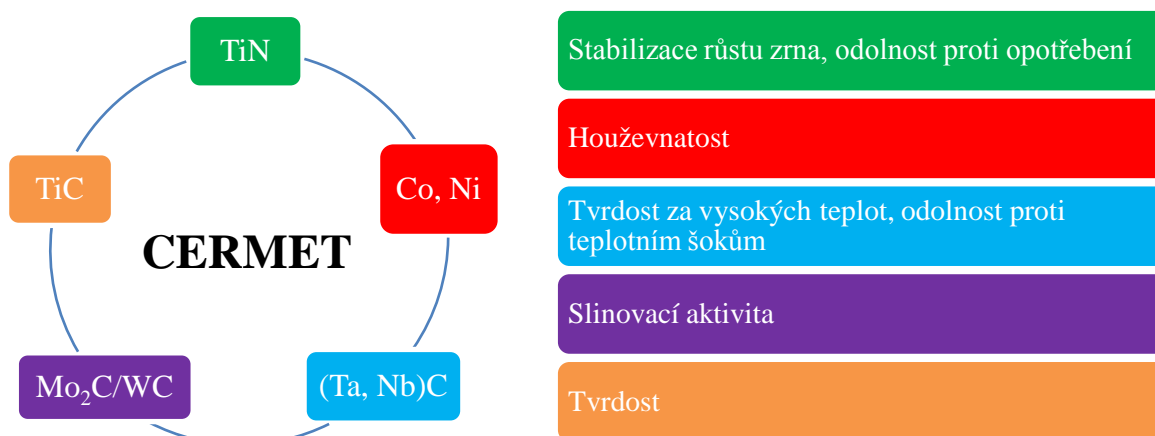
Obvykle je vyráběn přímým nauhličováním ze směsi odpovídajícího množství kovového molybdenového prášku a čistých sazí nebo práškového grafitu při teplotě asi 500 °C, ve vodíkové atmosféře, v uhlíkové trubkové odporové peci [2].

Molybden se vyskytuje v rudách v nízkých koncentracích (např. molybdenit, obr. 2.3.1). Molybdenit se buď těží, nebo se získává při výrobě mědi.

- **Karbonitrid titanu (TiCN)**

Přesný postup výroby karbonitridu titanu si jednotliví výrobci nástrojových materiálů pečlivě střeží, obvykle však jde o kombinaci karbotermické redukce a nauhličování oxidu titaničitého (TiO₂) nitridačním procesem. Základem pro vytvoření Ti(C, N) jsou karbid titanu TiC a nitrid titanu TiN. TiN má lepší tepelnou vodivost než TiC, proto mají cermety na bázi Ti(C,N) vyšší tepelnou vodivost a vyšší odolnost proti teplotním šokům než cermety na bázi TiC [2].

Vliv základních složek cermetu na jeho vlastnosti jsou uvedeny na obrázku (obr. 2.3.2).



Obr. 2.3.2 Vliv základních složek na vlastnosti.

2.3.1 Výroba a zpracování

Výchozími materiály pro výrobu jsou zejména prášky TiC, TiN nebo TiCN. Dalšími přísadami mohou být Mo₂C, VC, WC, NbC, TaC, ZrC, Cr₃C₂ atd. Základní pojivem cermetů je nikl, ke kterému je často přidáván kobalt kvůli snížení rozpustnosti Ti v Ni a stabilizaci karbonitridů [2].

Výroba cermetů je porovnatelná s výrobou SK, protože cermet je svým způsobem specifickým druhem slinutého karbidu. Výroba se skládá z pěti základních částí (podrobněji popsáno v kapitole 2.2.1):

- výroba prášků (karbidů, nitridů, karbonitridů, kobaltu, niklu a dalších);
- příprava směsi uvedených prášků (míchání, homogenizace, mletí, sušení);
- formování směsí (lisování, vytlačování);
- slinování (teploty 1 350 - 1 650 °C);
- povlakování (viz kapitola 2.2.3).

2.4 Řezná keramika

Keramika je všeobecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složky jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. K této definici se váže jak klasická keramika (cihly, cement, porcelán), ale také materiály používané k broušení a řada nových keramik (oxidová keramika, ferity, feroelektrika, nitridy, karbidy, boridy a další [2].

Nová keramika je vyrobena z velmi čistých surovin. Látky obsažené v keramice jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními (oba typy vazeb současně). Struktura keramických materiálů je tvořena převážně složitou kubickou a hexagonální mřížkou [2].

Řezná keramika je materiál, který je velmi tvrdý za vyšších teplot při vysokorychlostním obrábění. Pro použití je však nutné dodržet řadu podmínek (příloha 5), aby bylo využito jejich výhodných vlastností [1,2].

Základní vlastnosti řezné keramiky [2,30]:

- vysoká tvrdost, odolnost proti plastické deformaci;
- odolnost proti mechanickému namáhání (zejména tlak);
- odolnost proti vysoké teplotě a teplotním rázům;
- vysoká chemická stabilita, nereaguje s materiálem obrobku;
- odolnost proti opotřebení, chemickým vlivům a korozi (vysoká trvanlivost, řezivost);
- dostupnost základních surovin a relativně nízká cena.

Rozdělení a značení

Pro základní rozdělení keramik neexistuje žádná norma, ale je většinou rozdělena tímto způsobem:

- **oxidová keramika** - čistá (99,5%);
 - polosměsná;
 - směsná.
- **nitridová keramika**

Tab. 2.4.1 Značení keramiky.

Druh keramiky	Značení dle ČSN ISO 513	Chemický základ	Příklad
čistá	CA	Al_2O_3	
polosměsná	CA	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{CoO}$
směsná	CM	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$ $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$
nitridová	CN	Si_3N_4	

Většina druhu keramiky je možno v dnešní době vyrábět s otěruvzdornými povlaky (PVD, CVD), značených dle ČSN ISO 513 symbolem CC, nebo ve formě s vyztuženými vlákny (tzv. whiskery - SiC , Si_3N_4) [2].

Důležité materiály pro výrobu řezné keramiky jsou zejména oxidy Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 , karbid TiC a nitridy TiN , Si_3N_4 . Jsou to látky chemicky stabilní s vysokou tvrdostí, tlakovou pevností a odolností za vysokých teplot [2].

- **oxid hlinitý (Al_2O_3)**

Je vyráběný z nejznámější horniny obsahující hliník nazývaný se bauxit (obr. 2.4.1). K získání oxidu hlinitého je využita Bayerova metoda (postup v příloze 6), kterou se dosahuje čistoty 99,90%.



Obr. 2.4.1 Bauxit [31].

- **oxid zirkoničitý (ZrO_2)**

Je možné ho vyrábět z křemičitanu zirkoničitého (ZrSiO_4 , obr. 2.4.2) metodou termického rozkladu a redukce v elektrické peci, alkalickým tavením, chlorací (v šachtové peci je ohříván na teplotu 800-1200 °C směs ZrSiO_4 a uhlíku, do pece je přiváděn chlor), plazmovým hořákem (2600 °C) [30].



Obr. 2.4.2 Zirkon [32].

- **nitrid křemíku (Si_3N_4)**

Největším a nejznámějším zdrojem křemíku je křemen (obr. 2.4.3) z kterého se za pomoci metody přímé reakce prvku (nitridace křemíku), karbotermickou redukcí a nitridací oxidu křemičitého, termického rozkladu diimidu křemíku nebo srážením z plynné fáze získává Si_3N_4 . Jednotlivý popis metod je popsán v příloze 7 [30].



Obr. 2.4.3 Křemen [33].

2.4.1 Výroba a zpracování

Výroba keramických materiálů je velmi podobná výrobě slinutých karbidu a cermetů. Hlavním rozdílem ve výrobě je, že keramické materiály na rozdíl od ostatních nepotřebují žádný materiál jako pojivo, které by spojilo tvrdé zrna fáze do celistvého tělesa.

Základní postup výroby:

- příprava směsi uvedených prášků (míchání, mletí, sušení);
- formování směsi (lisování, lití, vstřikování, vytlačování);
- slinování;
- konečná úprava (broušení, povlakování PVD, CVD atd.)

Ve stručnosti jsou smíchány a pomlety základní prášky jednotlivých materiálů spolu s dalšími přísadami za sucha nebo za mokra (lepší tvarovatelnost materiálu). Následuje časově náročný proces sušení trvající více jak 24 hodin (vysušení směsi je velmi důležité, aby nevznikaly po slinování trhliny v materiálu). Nejdůležitější částí výroby je proces slinování, kdy dochází ke zhutňování materiálu, které se provádí za vysokých teplot (0,5 - 0,9 teploty bodu tání materiálu).

Využitím metody vysokoteplotního izostatického lisování tzv. HIP (Hot Izostatic Pressure), lze dosáhnout ještě lepších vlastností než u běžných typů lisování (tab. 2.4.2.). Metoda využívá všestranného tlaku a spékání zároveň. Jsou dva postupy metody HIP první je využití nerozpustné kapsle (např. ze skla, měkké oceli atd.), do které se materiál nasype a odplyní (výhoda: jednoduchá výroba zhutněného materiálu, nevýhoda: tvarování kapsle, odplynění, odstraňování kapsle po HIP). Druhý postup je bez použití nerozpustné kapsle (výhoda: zvýší se produktivita, nevýhoda: materiál musí být předem zhutněn-předslinován).

Celkově se využitím metody HIP značně zvýšila produktivita, zlepšili se vlastnosti a snížila se cena.

Tab. 2.4.2 Vliv HIP na mechanické vlastnosti keramik [2].

Vlastnost	Al ₂ O ₃		ZrO ₂		Si ₃ N ₄	
	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP
Relativní hustota [%]	97,5	99,8	98,3	99,7	95,7	99,7
Tvrdost [HRA]	93,0	93,7	90,0	91,0	92,5	93,5
Ohybová pevnost [MPa]	490	735	980	1568	980	1176
Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	3,0	3,5	7,5	8,0	7,0	7,5

Oxidové keramiky

Jsou vyrobeny z velmi čistého oxidu hlinitého Al₂O₃ spolu s malým množstvím přídavných látek (usnadňující slinování, zabráňující růstu zrna) mezi které patří oxidy zirkonia, yttria, chromu, titanu, niklu a další.

Před lisovacím procesem se často přidávají do směsi látky způsobující lepší tečení a snižující tření (lepší rovnoměrnost zaplnění formy). Využívá se lisování s oboustranným tlakem.

Z keramiky se nejčastěji vytlačují tyče o průřezu odpovídajícímu finální velikosti VBD, která jsou následně rozřezány na diamantové pile a slinovány ve speciálních pecích.

Nitridové keramiky

Základem nitridové keramiky je nitrid křemíku Si₃N₄. Vyskytuje se ve dvou krystalových modifikacích fáze α-Si₃N₄ (rovnosé krystaly v mikrostruktuře) a fáze β-Si₃N₄ (v jemnozrnné matici má rozptýlené protáhlé krystaly β), která je stabilnější za vysokých teplot.

Proces slinování je u nitridových keramik obtížnější než u oxidových. Je to způsobeno kovalentní vazbou nitridové keramiky, která zabráňuje procesu samodifúze (zabráňuje dosažení teoretické hustoty). Vysoká teplota by aktivovala difuzi, ale je tak vysoká že by docházelo k rozkladu materiálu před slinováním.

Podle výroby kompaktního tělesa rozlišujeme tyto druhy nitridové keramiky, které jsou podrobněji popsány v příloze 8 [2]:

- reaktivně vázaný nitrid křemíku (RBSN);
- slinutý nitrid křemíku (SSN);
- nitrid křemíku lisovaný za vysokých teplot (HPSN);
- nitrid křemíku vyrobený metodou HIP.

Sialonové keramiky

Sialonové keramiky jsou nitridové keramiky s proměnlivým obsahem oxidů. V mřížce nitridu křemíku β-Si₃N₄ lze nahradit křemík (Si⁴⁺) hliníkem (Al³⁺) a zároveň nahradit dusík (N³⁻) kyslíkem (O²⁻). Sialonová keramika β' vykazuje lepší chemické vlastnosti (vysoká teplotní stabilita, odolnost proti opotřebení). Sialony β' mají poměr nahrazení křemíku hliníkem a dusíku kyslíkem stejný, proto není zapotřebí doplnění kationtů.

U α' -sialonů je křemík hliníkem nahrazen vícenásobně než dusík kyslíkem, proto je u nich zapotřebí doplnit kationty z jiných prvků (např. Ca, Mg, Li, Ce, Y). Tímto nahrazováním lze docílit jiné struktury materiálu a změnit vlastnosti materiálu (tvrdost, lomová houževnatost) [2].

Vyztužené keramiky

Vyztužená keramika je vyráběna tak, že do základní matrice Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, Si_3N_4 nebo sialonu jsou přidávána vlákna tzv. whiskery (SiC , Si_3N_4). Pevnost těchto vláken se blíží k teoretické hranici pevnosti. Vyztužujícími vlákny je materiál výrazně zpevněn a zvýší se lomová houževnatost keramiky [2].

Mezi důležité parametry whiskerů patří délka l , průměr d , štíhlostní poměr l/d a také množství whiskerů v matrici keramiky [2].

2.5 Supertvrde řezné materiály

Jsou materiály, které mají podobné vlastnosti jako přírodní diamant. Lze do této skupiny zahrnout dva syntetické diamanty a to polykrystalický diamant (PKD) a kubický nitrid bóru (KNB nebo PKNB-polykrystalický). Oba tyto uměle vyrobené materiály mají velmi dobré mechanické vlastnosti a jsou používány jako řezné nástroje pro speciální operace.

Základní vlastnosti supertvrdých materiálů:

- vysoká tvrdost a pevnost;
- odolnost proti abrazivnímu opotřebení;
- odolnost proti tepelným a rázovým šokům;
- vysoká pevnost v tlaku a ohybu.



Obr. 2.5.1.1 KNB monolit [35].

2.5.1 Výroba a zpracování

Britové destičky ze supertvrdých materiálů mohou být vyráběny i tak, že na podložku ze slinutého karbidu je připájena nebo nanese silná vrstva PKD nebo PKNB (obr. 2.5.1.1). Možnost vyrábět monolitické destičky lze pouze z PKNB (kruhový tvar, obr. 2.5.1.2). Mohou mít hladicí tvar tzv. Wiper (obr. 2.5.1.3) nebo vybroušený jednoduchý tvar utvařeče (obr. 2.5.1.4).

Základní operace výroby PKD a PKNB [2]:

- příprava buňky pro syntézu monokrystalů;
- syntéza monokrystalů;
- slinování tělesa (např. krystaly PKNB + pojivo na podložce ze SK);
- rozřezání tělesa na segmenty požadovaného tvaru;
- pájení segmentu (nebo roubík) na VBD;
- broušení, případné honování funkčních ploch břitů.



Obr. 2.5.1.1 KNB spěkaná vrstva na SK [35].



Obr. 2.5.1.3 Hladicí destička Wiper [36].

- **Polykrystalický diamant (PKD)**

Základním materiálem pro výrobu PKD je monokrystalický diamant. Směs tvořená právě základním materiálem a pojivem (Co, Ni, Fe) je slinována na lisech za vysokých teplot (1300-1800 °C) a tlaků (5 GPa). Výsledná struktura je tvořena zrny diamantu spojených mezi sebou nebo za pomoci kobaltového pojiva. V poslední operaci se dokončuje tvar destičky broušením a vyleptáváním [15,34].



- **Kubický nitrid bóru (KNB)**

Vyrábí se za pomoci syntézy hexagonálního nitridu za přítomnosti katalyzátorů. Lisování probíhá za vysokých teplot a tlaků. Přeměnou hexagonální mřížky na kubickou se dosáhne tvrdosti KNB [2].

Obr. 2.5.1.4 KNB s utvařečem [38].

- **Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB)**

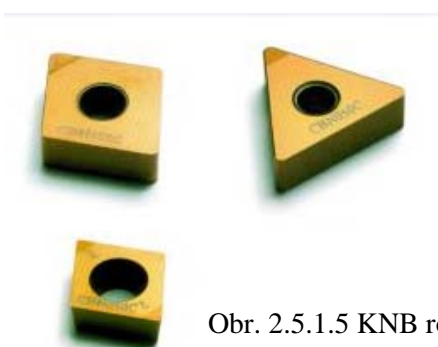
Vyrábí se slinováním spolu s pojivem (kobalt, nikl, hliník). Výroba je velmi podobná PKD [34].

Kompaktní polykrystalická tělesa často bývají povlakovány speciálními povlaky (Cr, Ti a Si atd.), aby se dosáhlo zvýšení pevnosti a trvanlivosti nástroje.

Polykrystalický diamant nesmí být použit pro obrábění materiálů na bázi železa a niklu, protože při překročení tepelné hranice 700 °C se diamant začne měnit na grafit a dochází k silné difuzi mezi nástrojem a obráběným materiálem. Nehodí se pro obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností. Nejvíce se diamant uplatňuje při obrábění hliníku (rychlostí až 5000 m.min⁻¹), slitin mědi, kompozitů, titanu a jeho slitin atd.

Kubickým nitridem bóru lze soustružit a frézovat kalené oceli do 65 HRC (rychlostí až 200 m.min⁻¹) i tvrzených slitin kde dokáže nahradit i operaci broušení. Díky své vysoké ceně se nevyplácí využívat pro měkké materiály (pod 45 HRC) z důvodu většího opotřebení. Je to nejtvrdší nitrid.

V dnešní době převažují destičky z PKD nebo PKNB s roubíkem, který je připájen do vybrání vytvořeného na špičce břitové destičky (obr. 2.5.1.5). Tím že je roubík ve svislém směru podepírán materiálem destičky, nedochází tím tak k vysokému namáhání pájeného spoje. Další varianta je tzv. zámková konstrukce (obr. 2.5.1.6), s kterou přišla firma Sandvik Coromant. Tato varianta odstraňuje nedostatky pájeného spoje (malá šířka záběru ostří a zeslabení pájeného spoje tepelným ovlivněním). Lze použít na jakýkoliv tvar destiček (může být připájen na všechny rohy destičky) [2].



Obr. 2.5.1.5 KNB roubík [35].



Obr. 2.5.1.6 KNB zámkový [37].

3 VÝZNAMNÍ SVĚTOVÍ VÝROBCI ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Výrobců v oblasti výroby nástrojů pro soustružení je v dnešní době nespočet. Loga níže uvedených výrobců je k vidění v příloze 17. Mezi nejvýznamnější firmy, které mají zastoupení v České republice, patří:

- **Sandvik – Coromant**

Je jedním z předních světových výrobců nástrojů pro soustružení a frézování. Společnost je dnes zastoupena už více jak ve 130 zemích po celém světě. Byla založena v roce 1862 a zabývala se výrobou oceli. Skutečná výroba řezných nástrojů začala až v roce 1942. Hlavní sídlo společnosti je ve švédském městě Sandviken. V České republice má zastoupení v Praze Sandvik CZ, s.r.o. Zaměstnává okolo 7500 lidí.

- **Pramet Tools, s.r.o.**

Je to ryze česká společnost zabývající se výrobou obráběcích nástrojů zejména ze slinutého karbidu. Hlavní sídlo společnosti je v Šumperku. Všechny produkty, které společnost nabízí, jsou vyráběny v České republice. Byla založena v roce 1951, kdy byla zahájena první výroba slinutých karbidů. Postupem let se společnost značně vyvíjela a vytvořila další pobočky v sousedících státech (Slovensko, Německo, Polsko). Potom se rozšířila po celé Evropě a získala své zákazníky ve více než 50 zemích světa. Dnes už patří do vlastnictví švédské firmy Seco Tools. Zaměstnává zhruba 2200 lidí.

- **Walter**

Celosvětově známá společnost, která se může chlubit až 49000 nástroji v oblasti frézování, soustružení a výrobě závitů. Společnost byla založena v roce 1919. Hlavní sídlo společnosti Walter AG je v Tübingenu na jihu Německa. Společnost má široké zastoupení po celém světě včetně všech kontinentů, až 33 poboček a mnoho prodejních partnerů. V České republice má zastoupení v Brně pod názvem Walter CZ s.r.o. Zaměstnává okolo 4000 zaměstnanců po celém světě.

- **Iscar**

Patří mezi skupinu největších předních výrobců v oblasti opracování kovů. Společnost založil Stef Wertheimer v Izraeli v roce 1952. Postupem času společnost expandovala z jednoho výrobního závodu až do 50 zemích po celém světě. Hlavní sídlo společnosti se přesunulo do průmyslové zóny TEFEN v západní Galilei v Izraeli. Společnost má dnes 140 dceřiných společností ve více jak 65 zemích. V České republice má zastoupení pod názvem Iscar ČR s.r.o. Společnost zaměstnává kolem 15000 lidí po celém světě. Iscar patří do společnosti IMC Group a je největší ze všech členů.

- **Seco Tools**

Přední světový výrobce vysoce výkonných obráběcích nástrojů. Působí na trhu s více než 25000 standartními produkty pro frézování, vrtání soustružení atd. Rok založení firmy se datuje na rok 1932. Hlavní sídlo společnosti je ve městě Fagersta ve Švédsku. Dnes má zastoupení ve více než 50 zemích po celém světě, spolu s 40 přidruženými dceřinými společnostmi. V České republice má zastoupení v Brně pod názvem Seco Tools CZ, s.r.o. Zaměstnává více než 5500 lidí.

Ukázka aktuálních novinek nástrojů některých výše uvedených firem jsou zobrazeny na obrázcích (obr. 3.1, 3.2, 3.3), spolu s přelomovými vlastnostmi, které uvádí výrobci.



Obr. 3.1 VBD GC4325 ze slinutého karbidu SK [39].

GC4325

Destička třídy využívající technologii Inveio™. Dosahuje opakovatelně své vysoké výkonnosti při obrábění ocelí. Nabízí vysokou odolnost proti otěru, dlouhou životnost a pevnost břitové destičky. Vyrábí ji společnost Sandvik – Coromant (obr. 3.1).

WMP20S

Jedná se o universální řezný materiál pro obrábění materiálu třídy ISO M a ISO P. Má širokou oblast použití jak pro nerezové tak pro ocelové materiály. Dosahuje vysoké produktivity díky technologii Tiger.tec®. Vysoká jakost řezné hrany, univerzálnost a dlouhá životnost. Vyrábí ji společnost Walter (obr. 3.2)



Obr. 3.2 VBD WM920S ze slinutého karbidu SK [40].

TP2500

Destička Duratomic dosahuje vynikajících výsledků v řadě soustružnických aplikací. Má velice dobré mechanické vlastnosti při chlazení i bez něj. Má širokou oblast použití, dlouhou životnost, vysoká jakost povrchu a odolnost proti opotřebení hřbetu. Vyrábí ji společnost Seco Tools (obr.3.3).



Obr. 3.3 VBD TP2500 ze slinutého karbidu SK [41].

4 VÝBĚR NÁSTROJŮ PRO DANOU SOUČÁST

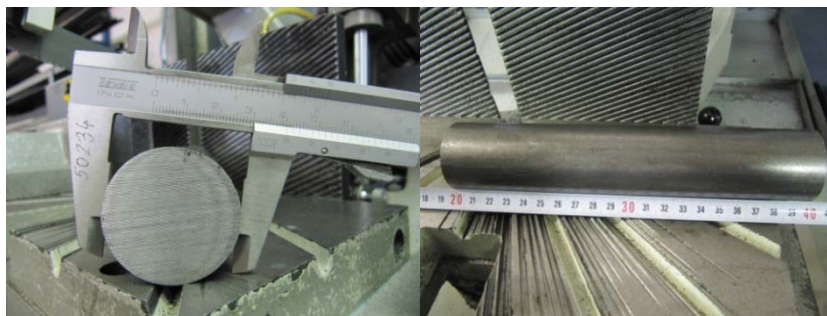
Nástroje byly aplikovány na p řez z ocelové tyče z materiálu označení DIN C16E (W.Nr. 1.1148). Jedná se o uhlíkovou ušlechtilou ocel. Obrobitelnost materiálu dle normativů řezných podmínek má 15b. Mez kluzu R_e je min. 235 MPa a mez pevnosti R_m min. 380 MPa.

Materiál byl dělen na strojní pásové pile Pegas 235x300 (SHI-LR-F) viz příloha 14. Rozměry přířezu byly vypočteny na základě rozměrů z výkresové dokumentace o základních rozměrech hřídele $\phi 36$ -198 mm (příloha 9) za pomoci vzorce pro stanovení přídávku na průměr. Přídavek na délku hřídele byl zvolen 3mm.

$$p = 0,05 \cdot d + 2 \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

kde: p [mm] – přídavek na průměr,
 d [mm] – největší průměr obrobku.

Přířez byl dělen z 6 metrové tyče o průměru $\phi 40$ o celkové délce 201 mm (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Rozměry odděleného přířezu $\phi 40$ – 201 mm.

Obrábění hřídele probíhalo na soustruhu Optimum (OPTI D280x700 G) zobrazeném v příloze 15. Nástroje použité k výrobě hřídele jsou uvedeny v nástrojovém listu (tab. 4.1)

Tab. 4.1 Nástrojový list.

VUT FSI ÚST BRNO		NÁSTROJOVÝ LIST		DATUM VYDÁNÍ:	3.5.14
Vyhotožil: LUKÁŠ TOMEK		Stroj: OPTI D280 x 700 G		Číslo výkresu součásti: VUT – 3K/1 - 01	Číslo listu: 1.
Pozice nástroje	znázornění	název nástroje název držáku	výrobce	označení výrobce	materiál
T1		Nůž hrubovací	Narex	OH 3716	P20
T2		VBD dokončovací	Quantum	1215H09	6640
		držák nožový	Quantum	PSSNR/L	
T3		Nůž ubírací	Narex	OH 3712	P20
T4		Nůž zapichovací š. 3 mm	Narex	OH 6383	P30
T5		středící vrták A2,5 ČSN 22 1110			HSS

4.1. Postup výroby dané součásti

Technologie výroby hřídele se obecně zpracovává v rámcovém technologickém postupu a ve výrobním postupu (návodka - podrobnější popis). Pracovní postup (rámcový) hřídele je vypracován v příloze 10. Výrobní postup (návodka) nebyl vypracován z důvodu nedostačujících podmínek k dodržení (nezjistitelné otáčky vřetene, ruční posuv, špatný stav soustruhu apod.). Jedná se o výrobu jediného kusu.

Jak bylo v úvodu kapitoly již zmíněno, základním polotovarem k výrobě hřídele je přířez o rozměrech $\phi 40 - 201$ mm, který byl dělen na strojní pásové pile. Další operace jsou prováděny na soustruhu nástroji vyobrazených na obrázku (obr. 4.1.3).

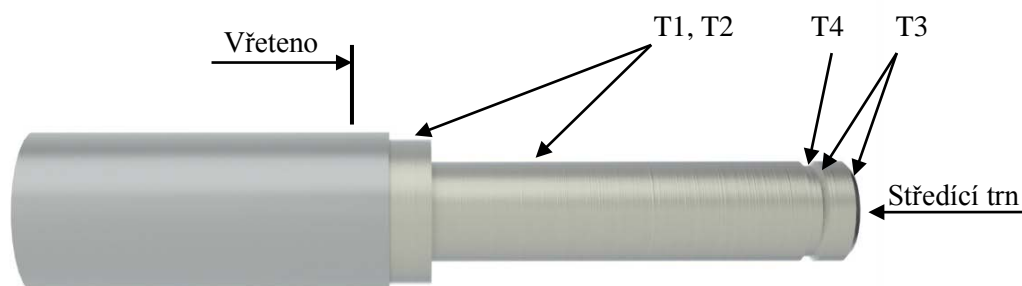
Základní popis operací při soustružení hřídele jsou:

1. Operace



Obr. 4.1.1 Upnutý přířez s navrtaným a stočeným čelem.

- Přířez je upnut do vřetena stroje (obr. 4.1.1) a je stočeno čelo nástrojem T3.
- Středícím vrtákem T5 je navrtán středící důlek a přířez je upnut na středící trn (obr. 4.1.1), aby nedocházelo k vibracím.



Obr. 4.1.2 Na čisto osoustružený obrobek se sraženými hranami a zápichem.

- Nahrubují se základní míry s přídavkem na dokončování 1,5 mm nástrojem T1
- Nástrojem T2 se dokončí rozměry dle výkresu a rozměry s tolerancí h8 uvedených na výkrese se nechá přídavek na broušení 0,3 mm.
- V posledním kroku se vysoustruží zápich nástrojem T4 a srazí hrany 1,5x45° nástrojem T3 (obr. 4.1.2).



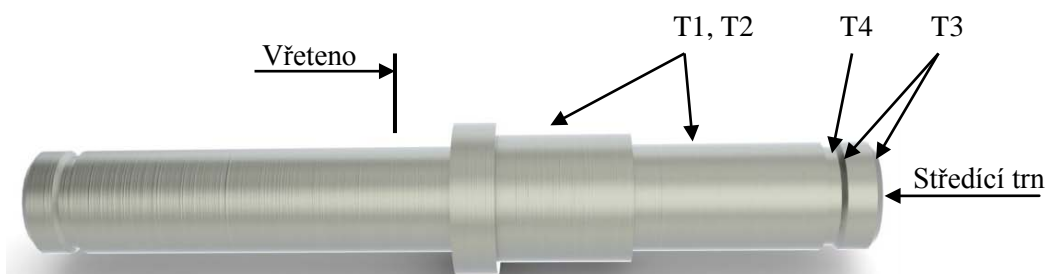
Obr. 4.1.3 Nástroje použité na výrobu hřídele.

2. Operace



Obr. 4.1.4 Otočený obrobek ve vřetenu se středícím důlkem a sraženým čelem.

- Obrobek je otočen ve vřetenu za obrobenou část hřídele a je stočeno čelo nástrojem T3 (obr. 4.1.4).
- Středícím vrtákem T5 je navrtán středící důlek a obrobek je upnut za středící trn.



Obr. 4.1.5 Na čisto osoustružený obrobek se sraženými hranami a zápichem.

- Nástrojem T1 se nahrubují jednotlivé průměry a nechá se 1,5 mm na dokončení.
- Dalším krokem je dokončení pomocí nástroje T2, soustruží se na čisto a nechá se 0,3 mm na průměru, kvůli dobroušení na h8.
- Zapichovacím nožem T4 se vysoustruží zápich a srazí se hrany 1,5x45° nástrojem T3.

Strojní t_{AS} čas vyrobené hřídele je 38,5 minuty. Celkový čas výroby je 52,2 minut, důvodem vysokého výrobního času jsou časté kontrolní měření prováděné pracovníkem, upínání obrobku do vřetene, upínání nástrojů, malý výkon soustruhu apod.

V případě, že by se jednalo o sériovou výrobu, nebyl by tento čas akceptovatelný. Pro srovnání výrobních časů byl sestaven výrobní postup (tzv. návodka) pro výrobu na číslicově řízeném soustruhu (Kovosvit MAS SP 180) viz příloha 11.

Po sečtení všech strojních časů v jednotlivých operacích se výroba hřídele snížila z 38,5 minuty na necelou 1,5 minutu.

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se zabývá technicko – ekonomickým porovnáním výroby navrhnuté hřídele (viz kapitola 4) na soustruhu OPTI D280x700G a číslicově řízeném soustruhu KOVOSVIT MAS SP 180 (příloha 16) při sérii 500, 3000 kusů. Všechny výsledné hodnoty jsou spočítány na základě využití jednoho stroje.

5.1 Strojní časy t_{AS}

Celkové strojní časy výroby jednotlivých sérií jsou popsány v tabulce (tab. 5.1).

Tab. 5.1 Strojní časy v dané sérii.

Počet kusů	Strojní čas t_{AS} [min]	
	OPTI D280x700G	MAS SP 180
1	38,5	1,368
500	19250	684
3000	114000	4104

Strojní čas výroby hřídele na soustruhu (OPTI D850x700G), byl zjištěn naměřením v průběhu výroby. U číslicově řízeného soustruhu jsou vypočteny pouze teoreticky (příloha 11).

5.2 Spotřeba elektrické energie

Spotřeba el. energie je popsána v tabulce (tab. 5.2).

Tab. 5.2 Spotřeba elektrické energie.

Počet kusů	Spotřeba energie [kWh]		Celková cena [Kč]	
	OPTI D280x700G	MAS SP 180	OPTI D280x700G	MAS SP 180
1	0,47	0,48	2,38	2,39
500	240,75	239,40	1203,75	1197,00
3000	1425,00	1436,40	7125	7182,00

Uvedené výsledky v tabulce jsou vypočítány za pomoci internetové kalkulačky na spotřebu elektrické energie z hodnot uvedených v předchozí tabulce a příkonu strojů (soustruh – 750W, číslicově řízený soustruh – 21 kW. Pro výpočet celkové ceny za spotřebovanou energii byla použita cena 5 Kč / kWh.

5.3 Trvanlivosti použitých nástrojů

Jednotlivé trvanlivosti nástrojů byly zjištěny na základě praxe obsluhy u jednotlivých strojů.

Soustruh OPTI D280-700G

- **Hrubování** – nůž stranový T1 - OH 3716:

- trvanlivost nástroje	30 min,
- počet možných broušení	3,
- čas hrubování jedné součásti	20,3 min.

- **Dokončování** – VBD T2 - 1215H09:

- trvanlivost nástroje 40 min,
- počet břitů na destičce 3,
- čas dokončování jedné součásti 9,16 min.

- **Zapichování** – upichovací nůž T4 - OH 6383:

- trvanlivost nástroje 35 min,
- počet možných broušení 1,
- čas upichování jedné součásti 3 min.

- **Srážení hran a stáčení čela** – ubírací nůž T3 - OH 3712:

- trvanlivost nástroje 45 min,
- počet možných broušení 4,
- čas upichování jedné součásti 3 min.

- **Vrtání** – středící vrták T5 - A2,5 ČSN 22 1110:

- trvanlivost nástroje 30 min,
- počet břitů 2,
- čas vrtání jedné součásti 0,34 min.

Číslicově řízený soustruh KOVOSVIT MAS SP 180

- **Hrubování** – VBD T1 - CNMM 120408E-NR:

- trvanlivost nástroje 20 min,
- počet břitů na destičce 2,
- čas hrubování jedné součásti 0,89 min.

- **Dokončování** – VBD T2 - DNMG 150604E-F:

- trvanlivost nástroje 30 min,
- počet břitů na destičce 2,
- čas dokončování jedné součásti 0,42 min.

- **Zapichování** – VBD T3 – LFUX 030802TN:

- trvanlivost nástroje 30 min,
- počet břitů na destičce 2,
- čas upichování jedné součásti 0,05 min.

- **Vrtání** – středící vrták T4 - A2,5 ČSN 22 1110:

- trvanlivost nástroje 30 min,
- počet břitů 2,
- čas vrtání jedné součásti 0,34 min.

Nástroje použité k výrobě jsou v nástrojovém listu v příloze 12. Časy jednotlivých operací u číslicově řízeného soustruhu jsou uvedeny v příloze 11. Vzorce použité k výpočtu návodky jsou v příloze 13

U pájených destiček nelze určit přesný počet broušení jednou je zapotřebí obrousit 1 mm nebo více či méně (0,1 mm), proto lze počítat s průměrnou velikostí brusy 0,5 mm (obr. 5.5.1). Brousí se zhruba do půlky břitové destičky (důležité je zachovat úhly nástroje).

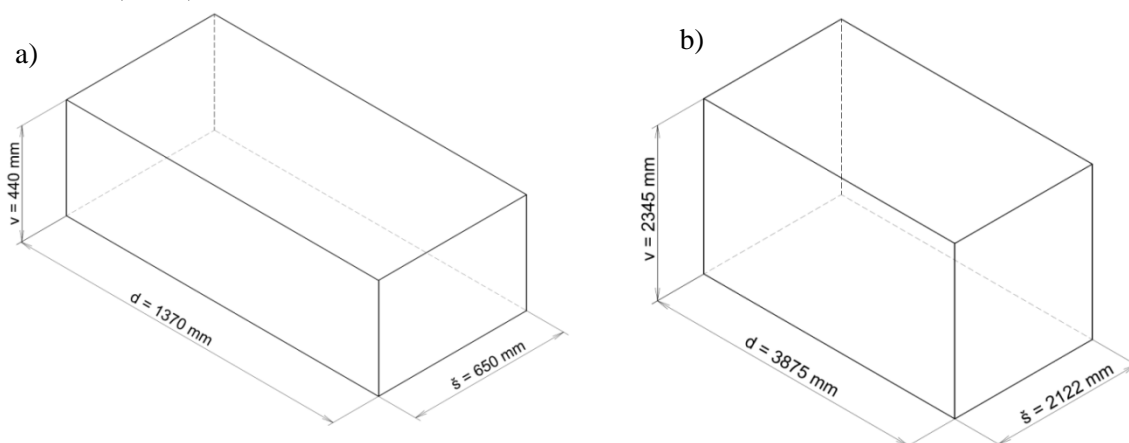
5.4 Podlahová plocha

Podlahová plocha stroje je určena za pomoci základních rozměrů stroje a vzorce (5.1).

$$P = d \cdot š \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.1)$$

kde: P – podlahová plocha stroje,
d [m] – délka stroje,
š [m] – šířka stroje.

Podlahová plocha soustruhu OPTIMUS OPTI D280x700G je 0,891 m². Rozměry viz obrázek (5.4.1)



Obr. 5.4.1 a) Rozměry soustruhu OPTI D280x700G; b) Rozměry číslicově řízeného soustruhu SP 180.

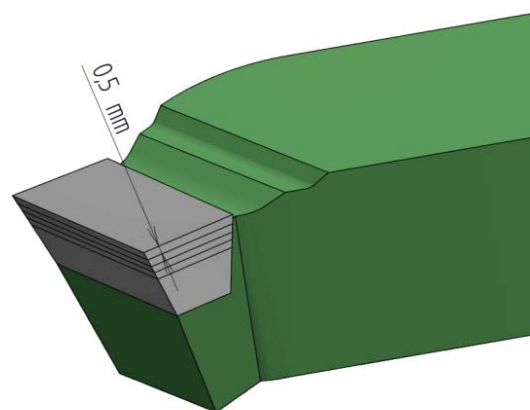
Podlahová plocha soustruhu KOVOSVIT MAS SP 180 je 8,223 m². Rozměry viz obrázek (5.4.1)

5.5 Shrnutí

Oba soustruhy mají své výhody i nevýhody, klasický soustruh má nižší spotřebu energie a možnost použít levnější nástroje (pájené). Má menší rozměry. Ale na druhou stranu má slabý výkon, nízkou tuhost a hodí se spíše pro kusovou výrobu, protože výrobní časy jsou velmi dlouhé.

Číslicově řízený má naopak vyšší spotřebu energie a je zde výhodné použít kvalitních povlakovaných nástrojů. Větší rozměry, vyšší tuhost a výkon. Výrobní časy jsou krátké a hodí se při velkosériové výrobě (čím více kusu tím je výhodnější jeho využití).

Z tabulky 5.2 je jasně zřetelné, že celkové energetické náklady na výrobu hřídele jsou téměř srovnatelné. V tabulce 5.1 je vidět obrovský rozdíl strojních časů, z kterých plyne jasná volba výroby v případě sériové výroby.



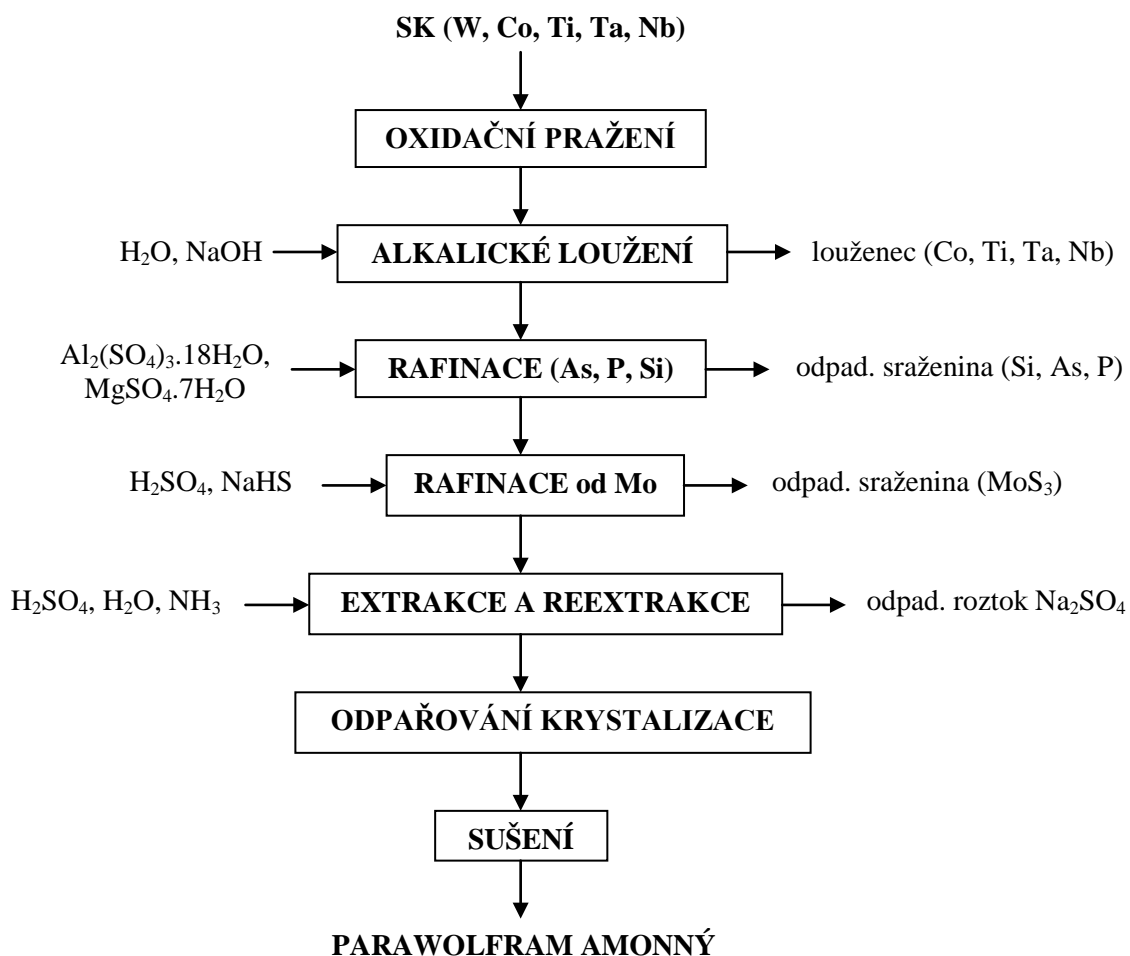
Obr. 5.5.1 Stanovení počtu broušení u ubíracího nože OH 3712.

6 RECYKLACE

Zvládnutí recyklace použitých břitových destiček je v dnešní době nejdůležitější částí ve zpracování řezných materiálů. Největším důvodem, proč začaly společnosti produkující řezné nástroje řešit jejich recyklaci, jsou zejména omezené přírodní zdroje používaných materiálů (wolfram, tantal, niob, titan a kobalt) a samozřejmě kvůli životnímu prostředí.

Recyklace je velmi složitý proces, který musí splňovat určitá pravidla lišící se v různých zemích. Nejznámější způsoby zpracování použitých řezných destiček lze rozdělit na přímé s fyzikální podstatou (Zn-proces) a nepřímé (alkalické). Téměř dvě třetiny se zpracovávají nepřímo alkalicky, kdy je vstupní materiál podroben oxidaci, následně se louží v alkalickém prostředí. Vzniklý roztok je rafinován od nečistot a je podroben extrakci a konverzi na meziprodukt wolframan amonný (tato technologie je velmi energeticky náročná a spotřebuje velké množství vody, obr. 6.1). Alternativní technologií zpracování použitých materiálů je HMZ-proces, který je založen na oxidačním pražení tvrdokovů na bázi slinutých karbidů (WC-Co), následném loužení pražence, rafinaci vzniklých roztoků (síranu kobalnatého, wolframanu amonného) až do krystalických produktů (nižší množství vyprodukovaných odpadů a nižší spotřeba vody) [42].

Jedny z největších společností produkující břitové destičky se věnují recyklaci už několik let (Seco, Sandvik Coromant apod.). Recyklačním procesem se snaží dosáhnout obnovitelnosti použitých materiálů na výrobu, jejichž zásoba se rychle ztenčuje. V dnešní době dokážou obnovit téměř 99% použitých materiálů.



Obr. 6.1 Technologie recyklace SK (alkalicky) [42].

7 DISKUZE

Vypracovaná práce má informativní charakter a jejím účelem je seznámit čtenáře se základními nástrojovými materiály používaných při obrábění železných výrobků.

Rychlořezné oceli, jsou nejstarším řezným materiálem. Mají vysokou houževnatost a širokou oblast použití. Lze je vyrobit běžnými technologiemi. Výhodou je i nižší cena oproti ostatním řezným materiálům. Nevýhodou je snižující se tvrdost při překročení teploty nad 500 °C a nízká odolnost proti opotřebení. V dnešní době jsou z velké části nahrazeny slinutými karbidy. Možnost pouze PVD povlaků.

Slinuté karbidy jsou vyráběny práškovou metalurgií. Obsahují částice tvrdých karbidů. Mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení za vysokých teplot do cca 900 °C. Na druhou stranu mají malou houževnatost oproti rychlořezným ocelím. Vyrábí se ve formě břitových destiček určených k pájení nebo jako vyměnitelné břitové destičky k mechanickému upínání. Možnost PVD a CVD povlaků.

Cermety jsou spíše alternativou slinutých karbidů, vznikly zejména kvůli úspoře omezených zdrojů W a Co. Tyto materiály byly nahrazeny materiály TiC, TiCN, TiN. Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Používají se jemné obrábění a dokončovací operace u ocelí. Mají nízkou houževnatost a špatnou odolnost proti opotřebení. Výhodou je vysoký tvrdost a pevnost za vysokých teplot. Možnost PVD a CVD povlaků.

Řezná keramika je vyrobena z velmi čistých surovin například z oxidu hlinitého, zirkoničitého nebo nitridu křemíku. Výroba je velmi podobná cermetům a slinutým karbidům pouze bez užití pojiva. Mají vysokou tvrdost, odolnost proti plastickým deformacím, odolnost proti opotřebení a odolnost proti vysokým teplotám a teplotním rázům. Výhodou je dostupnost základních surovin tzn. relativně nízká cena nástroje. Možnost PVD a CVD povlaků.

Supertvrdé řezné materiály jsou materiály s podobnými vlastnostmi, jako má diamant. Mají vysokou tvrdost a pevnost, odolnost proti teplotním a rázovým šokům, vysokou pevnost v tlaku a ohybu a vysokou cenu. Díky svým vlastnostem jsou využívány pouze ve speciálních operacích. Jsou tři syntetické diamanty polykrystalický diamant, kubický nitrid bóru a polykrystalický kubický nitrid bóru. Dnes se nejčastěji vyskytuje ve dvou variantách první varianta je ve formě roubíku kdy je PKD nebo PKNB připájen do vybrání v břitové destičce nebo jako destička se zámkovou konstrukcí. Možnost PVD a CVD povlaků

Provedená aplikace nástrojů na obrobek potvrdila očekávané výsledky. Výsledkem obrábění dle pracovního postupu je hřídel o předem zadaných rozměrech. Jednotlivé tolerance uvedené na výkrese (příloha 9) nejsou dodrženy, pouze byl zanechán přídavek na dobroušení na zadanou toleranci h8.

Strojní čas výroby hřídele je 38,2 minut. Z hlediska sériové výroby je čas neakceptovatelný. Takto vysoký čas výroby mohl být způsoben těmito faktory:

- špatný stav stroje – nebyla delší dobu provedena údržba,
- malý výkon,
- nízká tuhost – dochází k nepříznivým vibracím,
- opotřebované nástroje,
- lidský faktor.

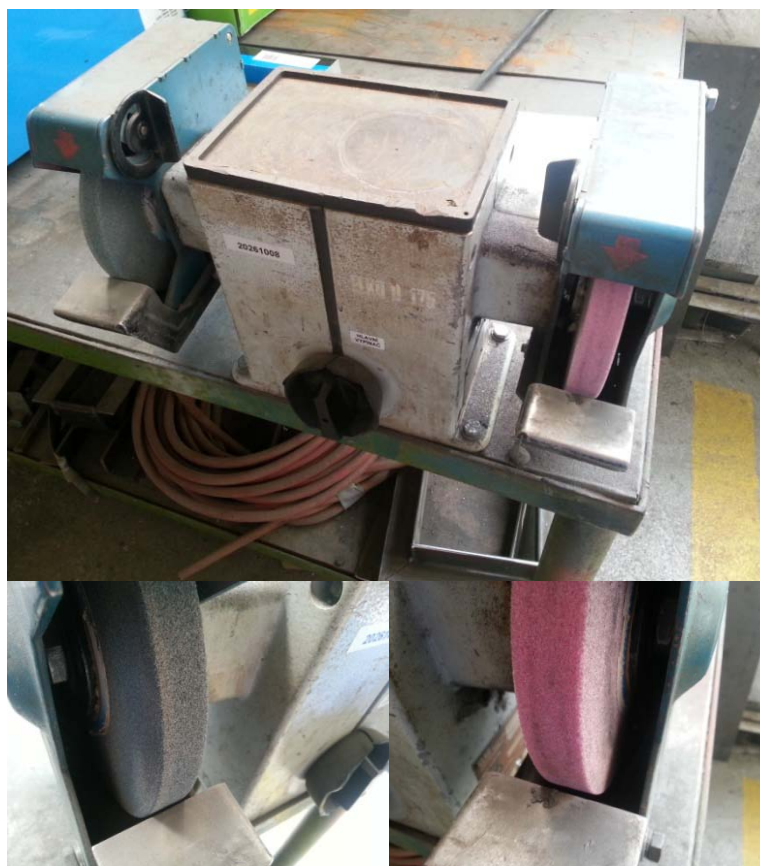
U hlubšího úběru materiálu z obrobku dochází u stroje s nízkým výkonem k poklesu otáček nebo až k úplnému zastavení vřetene (nutnost snížit úběr materiálu).

Nízká tuhost stroje znamená, že v průběhu obrábění je nástroj od obrobku vysokým odporem (mezi obrobkem a nástrojem) odtlačován od obrobku i přes nastavený úběr na noniusech. Nástroj neobrobí celou plochu obrobku a cestou zpět nástroj vykreslí hrubou texturu z neobrobeného materiálu.

V případě otupení nebo vylomení břitové destičky nástroje je zapotřebí nástroj znovu přebrousit. U broušení je nutné zachovat pracovní úhly nástroje a použít brusku se speciálními kotouči (obr. 7.1). Pájená břitová destička se dá přebrousovat několikrát, ale nejvíce do půlky břitové destičky, protože by mohlo dojít při vysokém odporu k vylomení nebo se může uvolnit pájený spoj.

Při srovnání uvedeného času výroby s výrobou na číslicově řízeném soustruhu bylo dospěno k závěru, že soustruh použitý k výrobě hřídele se hodí pouze na kusovou výrobu nebo na úpravu předem obrobených součástí (dlouhý čas výroby- 38,2 minut). Při sériové výrobě by bylo vhodnější využít číslicově řízeného soustruhu, jehož výrobní časy jsou s porovnáním s klasickým soustruhem daleko menší (méně než 1,5 minuty).

Výrobní závod, kde byla hřídel obráběna, nevyrábí součásti ve velkých sériích. Soustruh je zde využíván pouze na kusovou úpravu již obrobených součástí, které je zapotřebí usadit do sestav. Proto nákup nového zařízení by nebyl vhodný z hlediska využitelnosti a vysoké ceny.



Obr. 7.1 Bruska k broušení soustružnických nástrojů, pravý kotouč slouží k obroušení držáku nástroje a levý k broušení břitové destičky (včetně utvařeče).

ZÁVĚR

Téma bakalářské práce bylo zaměřeno na nástrojové materiály používané pro obrábění kovových výrobků, bez kterých se novodobé strojírenství neobejde. U jednotlivých materiálů byla řešena jejich výroba, u které mají materiály hodně společného a to výrobu práškovou metalurgií včetně rychlořezných ocelí. V práci byly krátce zmíněny i primární materiály potřebné pro výrobu nástrojových materiálů. Nástroje vyráběné z těchto materiálů se vyskytují v různých formách, buď jako vyměnitelné destičky upevněné mechanicky na tělo nože, napevno uchycená břitová destička pájeným spojem nebo jako monolit celý z nástrojového materiálu. Uvedené typy lze povlakovat pomocí technologií PVD a CVD.

Praktická část práce byla věnována aplikaci předem zvolených nástrojů na ocelový přířez dělený na pásové pile. Byl vytvořen rámcový postup výroby a jednoduše popsány jednotlivé operace, které byly znázorněny graficky. U srovnání strojních časů výroby a energetické náročnosti u dvou odlišně řízených strojů, byl potvrzen předpoklad, že ruční soustruh se hodí na kusovou výrobu (vysoký strojní čas).

Závěr práce je věnován recyklaci, která je v dnešní době velmi důležitá a je na ni kladen čím dál větší důraz. Přední světoví výrobci mají vlastní výzkumná střediska věnující se právě ekologické recyklaci a návratnosti materiálu z použitých nástrojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997, 1 svazek v různém stránkování. ISBN 9197229946.
2. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. Praha: Vogel Publishing, 1997-. ISSN 12122572. 1x měsíčně.
4. Cermet. *news.thomasnet* [online]. 2003 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://news.thomasnet.com/fullstory/Cermet-Grade-suits-finishing-applications-20506>
5. Vlákna z karbidu křemíku. *Cs.wikipedia* [online]. 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1kna_z_karbidu_k%C5%99em%C3%ADku
6. Keramické destičky. *mmspektrum* [online]. 2010 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/sandvik-coromant-uvadi-na-trh-novou-keramickou-tridu-urcenou-pro-vysokorychlostni-obrabeni-litin.html>
7. VINTR, Josef. Supertvrdé řezné materiály a jejich efektivní využití. *dspace.k.utb* [online]. 2006 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1976/vintr_2006_bp.pdf?sequence=1
8. Přírodní diamant. *milansedlacek* [online]. [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.milansedlacek.com/jedinecnost-prirodnich-diamantu>
9. Syntetický diamant. *stavebni-technika* [online]. 2008 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://stavebni-technika.cz/clanky/diamantova-technika-rezani-deleni-a-brouseni-od-firmy-matl-a-bula/>
10. CIHLÁŘOVÁ, Petra. *Zvyšování řezivosti rychlořezných nástrojových ocelí na bázi PVD povlakování a použití moderních řezných kapalin: vutium.vutbr* [online]. 2007 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3618-3.pdf>
11. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
12. Soustružnické nože. *kovonastroje* [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.kovonastroje.cz/>
13. Druhy rychlořezných ocelí. *tumlikovo* [online]. 2010 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-rychlomeznych-oceli-hss/>
14. JEŘICHOVÁ, Miroslava. *Materiály pro řezné nástroje*. [online]. 2013 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fdumy.cz%2Fstahnout%2F131666&ei=RERSU6G8FaSo4ATe9YGYAQ&usg=AFQjCNHstYnVUb4TtkKgg4hUE9romJ_54w&sig2=IR9maptrNiSW18Rk0Oq8DA
15. Nástrojové materiály. *u12134.fsid.cvut* [online]. 2013 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf

16. Skupiny obráběných materiálů. *sandvik.coromant* [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
17. Monolitní soustružnické nože. *mmspektrum* [online]. 2012 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/presne-obrabeni-malych-vnitrnich-prumeru.html>
18. Wolfram. *unimagnet* [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://unimagnet.cz/724-Wolfram-supinky-10-g.html>
19. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 193 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2336-6.
20. Rutil. *treehugger* [online]. 2008 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.treehugger.com/sustainable-product-design/new-mineralogy-gallery-at-rom-rocks.html>
21. Tantalová ruda. *10308.kz.all* [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://10308.kz.all.biz/cs/tantalove-rudy-g164088>
22. Vanadinit. *rayerminerals.homestead* [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://rayerminerals.homestead.com/Verkoop_mineralen_6.html
23. Chromit. *naturporten* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.naturporten.dk/temaer/gr%C3%B8nlands-mineraler/oxider/item/chromit>
24. Kobaltit. *volksapotheke-schaffhausen* [online]. 2011 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.volksapotheke-schaffhausen.ch/2011/SpurenE_Kobalt.html
25. Kulový mlýn. *pspeng* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.pspeng.cz/GrindingSystems/Mills/BallMills.aspx>
26. Izostatické lisování za tepla. *mmspektrum* [online]. 2005 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/izostaticke-lisovani-za-tepla.html>
27. Příručka obrábění. *taegutec* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf
28. Molybdenit. *minam.estranky* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.minam.estranky.cz/fotoalbum/prirustky/cechy-a-slovensko/molybdenit--krupka.html>
29. Millerit. *de.wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://de.wikipedia.org/wiki/Millerit>
30. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-858-2510-4.
31. Bauxit. *mineralien.goblack* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://mineralien.goblack.de/erze/bauxit.html>
32. Zirkon. *ruby.chemie.uni-freiburg* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/silicate_2_4.html
33. Křemen. *mineraly* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.mineraly.net/images/oxidy/kremen.htm>

34. Jelínek, Adam. Technologické podmínky aplikace supertvrdých řezných materiálů: *Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s., 2 přílohy. Vedoucí práce doc. Jaroslav Prokop, CSc.
35. KNB. *mmspektrum* [online]. 2006 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-do-vyroby.html>
36. Wiper. *mmspektrum* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-nastrojich-pro-rok-2014.html>
37. CB7015. *mmspektrum* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/efektivnejsi-soustruzeni-tvrzenych-soucasti.html>
38. CBN300. *secotools* [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Products/Advanced-cutting-materials/PCBN/Secomax-Chipbreaker/>
39. GC4325. *sandvik.coromant* [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/campaigns/gc4325/Pages/default.aspx>
40. MP20S. *walter-tools* [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/cs-cz/tools/innovations/Turning/Pages/innovations-turning-2/new-products-turning-2.aspx>
41. TP2500. *secotools* [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling1/General-Turning/TP2500/>
42. Recyklace tvrdokovového odpadu. *metal2014* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_00/papers/636.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
RO	[-]	rychlořezná ocel
HSS	[-]	High Speed Steels
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
PKD	[-]	polykrystalický diamant
KNB	[-]	kubický nitrid bóru
PKNB	[-]	polykrystalický kubický nitrid bóru
HPHT	[-]	High Pressure, High Temperature
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
HRA	[-]	tvrdost podle Rockwella
CIP	[-]	Cold Isostatic Pressing
HIP	[-]	Hot Isostatic Pressing

Symbol	Jednotka	Popis
R_a	[μm]	střední aritmetický hodnota drsnosti
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
p	[mm]	přídavek na průměr
t_{AS}	[min]	strojní čas
P	[m ²]	podlahová plocha stroje

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Metoda PVD
Příloha 2	Metoda CVD
Příloha 3	Rozdělení SK do 6 aplikačních skupin včetně podskupin
Příloha 4	Nikl
Příloha 5	Hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky
Příloha 6	Výroba oxidu hlinitého
Příloha 7	Výroba nitridu křemíku
Příloha 8	Typy nitridové keramiky
Příloha 9	Výkres hřídele
Příloha 10	Pracovní postup – rámcový
Příloha 11	Výrobní návodka
Příloha 12	Nástrojový list
Příloha 13	Vzorce použité při výrobě návodky
Příloha 14	Strojní pásová pila Pegas 235x300 (SHI-LR-F)
Příloha 15	Soustruh Optimum OPTI D280x700G Vario
Příloha 16	Číslicově řízený soustruh KOVOSVIT MAS SP 180
Příloha 17	Loga hlavních lídrů v oblasti výroby řezných nástrojů

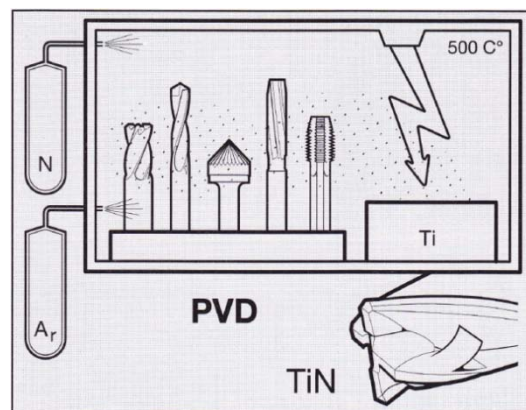
PŘÍLOHA 1 – 1/2

Metoda PVD

Vrstva povlaku je vytvářena z jednotlivých dopadajících atomů (obr.1.1). Atomy jsou na povrchu nejdříve zachyceny procesy sorpce (chemické nebo fyzikální), pohybují se po povrchu a potom jsou buď zachyceny trvalou vazbou, nebo zpětně uvolněny. Další dopadající atomy se díky pohyblivosti po povrchu mohou spojit vazbou s dříve zachycenými atomy a postupně tak vytvářet izolované zárodky (jádra) a ostrůvky rostoucí vrstvy. Ty se potom spojují, až vytvoří souvislou vrstvu, která dále roste a zvětšuje svou tloušťku. K nevýhodám všech metod PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty (rotační držáky nástrojů), aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu (tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec netvoří). Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran (tedy i tzv. „ostré“ ostří nástroje, s poloměrem zaoblení pod 20 μm) [2].

Povlak je nejčastěji vytvářen:

- Naprašováním (evaporation),
 - Naprašováním (sputtering),
 - Iontovou implementací (ion-plating).
- Naprašování



Naprašování je depozice částic, oddělených z povrchu zdroje fyzikálním odprašovacím procesem. Obvykle probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu ($< 0,7 \text{ Pa}$), kdy se odprašené částice dostanou na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu, v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Může být prováděno i při vyšším tlaku ($0,7 - 2,0 \text{ Pa}$), kdy jsou odprašené nebo odražené částice terče „ohřívány“ srážkami s částicemi plynu předtím, než se dostanou na povrch substrátu. Touto metodou lze vytvářet tenké povlaky z těžkovitých materiálů bez požadavku ohřevu terče na vysokou teplotu, která je potřebná při odpařovacím procesu. Naprašovací zařízení sestává z katody (terče) vyrobené z materiálu, který má být nanášen, držáku substrátu, odprašovacího plynu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Doutnavý výboj vytvořený elektrickým polem hoří ve velmi zředěném inertním plynu (zpravidla argonu) ve vakuové komoře (10^{-2} až 10^{-5} Pa), která plní funkci anody. Nad záporně nabitým terčem (-500 až $-1\,000 \text{ V}$) se výbojem udržuje argonová plazma, jejíž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na terč a při dopadu z jeho povrchu v důsledku přenosu pohybové energie vyrážejí (odprašují) jednotlivé atomy nebo molekuly. Rozsah odprašovaných pevných látek je veliký, vyloučeny jsou jen látky s nízkou tenzí nasycených par za pokojové teploty. Je třeba rozlišovat látky elektricky vodivé a elektricky nevodivé, ve druhém případě musí být zabráněno nabíjení terče použitím střídavého elektrického pole. Doprovodnými jevy jsou sekundární emise elektronů a iontů, odraz nahodilých částic, emise záření, desorpce plynů, chemický rozklad, atd [2].

PŘÍLOHA 1 – 2/2

- Napařování

V napařovacích procesech je materiál odpařován z terčů, které jsou ohřívány různými způsoby. Substrát může být ohříván a/nebo připojen na požadované předpětí použitím stejnosměrného nebo střídavého napájení (RF frekvence). Napařování probíhá ve vakuu, při tlaku 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Při tomto tlaku je střední volná dráha v porovnání se vzdáleností terč - substrát velmi velká ($5 \cdot 10^2$ až 10^7 cm). Odpařené atomy se tedy před kondenzací na substrátu pohybují po nekolizních dráhách, což vede k vytváření povlaku s nerovnoměrnou tloušťkou (největší těsně nad terčem, s rostoucí vzdáleností postupně klesá). Kvůli zmenšení střední volné dráhy je do komory přiváděn odpovídající plyn (např. argon) pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa, takže odpařené složky při transportu na substrát prodělají vícenásobné srážky, což vede k vytvoření povlaku s rovno-měrnou tloušťkou. Odpařovací zdroje jsou klasifikovány podle způsobu ohřevu pro přeměnu z tuhého nebo kapalného stavu do parní fáze (odporově, indukčně, oblouk, paprsek elektronů, laser, atd.). Nejjednoduššími odporovými zdroji jsou vyhřívané dráty a kovové fólie různého typu. Jsou dostupné v různých velikostech a tvarech, jejich cena je nízká a proto mohou být po provedení jednoho experimentu v případě potřeby vyřazeny. Jsou obvykle vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tavení (W, Mo, Ta) a nízký tlak par, takže nekontaminují vytvářený povlak. Pro teploty pod 1 000 °C jsou někdy vyráběny z platiny, železa nebo niklu [2].

- Iontová implantace

Iontová implantace je hybridní PVD proces povlakování, u kterého je povrch substrátu a/nebo deponovaný povlak bombardován svazkem částic s vysokou energií. Zdrojem deponovaných složek může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry. Protože je mezi substrátem (katoda, záporný potenciál) a zdrojem odpařovaného materiálu (terčem) vytvořeno silné elektrické pole (50-1000 V), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu, i odpařené částice terče. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu. Atomy látky, určené k vytvoření povlaku, jsou z povrchu terče odprašovány pomocí urychlených iontů, ionty z plazmy současně dopadají i na povlakovaný předmět (jejich energie je určena elektrickým napětím U_b , přiváděným na povlakovaný předmět). Tím lze provést iontové čištění povrchu substrátu před depozicí povlaku ($U_b = -1000$ V) a z rostoucí vrstvy povlaku odstranit hůře vázané atomy ($U_b = -50$ až -100 V). Dopad iontů během nanášení výrazně ovlivňuje vlastnosti vzniklého povlaku (např. tvrdost, vnitřní napětí, adhezi k substrátu) a umožňuje vznik sloučenin při teplotách podstatně nižších, než jsou teploty nutné pro rovnovážné chemické reakce. Napařováním Ti v prostředí N_2 (O_2 , CH_4) lze tak například nanášet povlak TiN (TiO_2 , TiC) již při teplotách 200 - 450 °C. Iontovou implantací je možno nanášet povlaky rozmanitého složení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi i na tepelně zušlechtnuté materiály, nebo dokonce plasty [2].

PŘÍLOHA 2 – 1/2

Metoda CVD

Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plyných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrch [2].

Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid, TiCl_4). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_3 , CH_4) [2].

V poslední době se stále častěji používají různě modifikované CVD metody, ke kterým patří např. metoda CVD se žhavicím vláknem (Hot Filament CVD - HFCVD) nebo laserem indukovaná CVD metoda (Laser Induced CVD - LICVD, LCVD), metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem (Cascade Arc Plasma – assisted CVD – CACVD), plazmaticky aktivované CVD metody (označení PCVD, nebo též PACVD – Plasma Assisted CVD, PECVD - Plasma Enhanced CVD, MWPCVD - MicroWave Plasma CVD, mikrovlnná plazmatická CVD metoda), MTCVD (Middle Temperature CVD) [2].

Metoda **HFCVD** využívá žhavicí wolframové vlákno, ohřáté na velmi vysokou teplotu (až $2400\text{ }^\circ\text{C}$), které je umístěno blízko substrátu (80 mm). Rychlost depozice povlaků je o jeden řád vyšší než u klasické CVD metody. Tato metoda se používá např. pro vytváření diamantových povlaků [2].

Metoda **LICVD** existuje ve dvou variantách, jako pyrolytická a fotolytická. U pyrolytické metody jsou molekuly plynu na mezifázovém rozhraní plyn-substrát štěpeny lokalizovaným ohřevem substrátu, na který dopadá paprsek laseru. Tato metoda je limitována volbou kombinace laser - zdrojový plyn - substrát. Zdroje par by měly být při dané vlnové délce laserového záření relativně transparentní, substrát silně absorbující. U fotolytické metody jsou molekuly poblíž substrátu štěpeny fotochemickou reakcí [2].

Metoda **CACVD** je založena na principu reaktoru, který využívá vlastnosti homogenního sloupce lineárního plazmatického výboje (ve válcové nebo pravoúhlé komoře s délkou více než 1 m). Pracuje v rozsahu tlaků od 13 Pa až po atmosférický tlak, v plyném prostředí $\text{Ar-H}_2\text{-CH}_4$. Držáky substrátu jsou sestaveny tak, aby působily jako virtuální obal, který udržuje výboj v katoru a možná kontaminace povlaku substrátu z chemických reakcí mezi stěnou reaktoru a parami, v důsledku vysoké teploty stěny reaktoru. Proto tento typ reaktoru vhodná pro případy, kdy probíhající reakce jsou exotermické (vysoká teplota stěny zamezuje nežádoucí usazování povlaku). U druhého typu reaktoru je ohříván pouze držák substrátu. Tento reaktor se používá v případech, kdy probíhající reakce jsou endotermické. Protože substrát má vyšší teplotu než stěna reaktoru, probíhají reakce přednostně na substrátu a nedochází ke kontaminaci povlaku v důsledku reakcí mezi stěnou reaktoru a parami. Stěna reaktoru je velmi často chlazena vodou [2].

PŘÍLOHA 2 – 2/2

U metody **PCVD** jsou molekuly reaktivního plynu ionizovány plazmovým výbojem, který doutná v komoře reaktoru při tlaku 100÷300 MPa (výboj je vyvolán přiložením negativního pólu elektrického napětí na povlakovaný předmět). Tím lze dosáhnout snížení teploty povlakování na hodnoty 400÷600 °C, Bunshah uvádí ještě nižší teplotu, a to 300 °C. První slinuté karbidy s PCVD povlakem TiN uvedla na trh firma Widia v roce 1989 [2].

Molekuly plynu jsou u metody PCVD rozkládány zejména neutrálními částicemi, radikály a ionty, generovanými srážkami elektronů. Hlavní roli přitom mají neutrální radikály a to ze dvou důvodů. Za první, disociační energie je u mnoha plynových molekul obvykle nižší než ionizační a proto je rychlost tvorby radikálů zpravidla vyšší než rychlost tvorby iontů. Za druhé, pozitivní ionty mohou být unášeny k jakémukoli povrchu a znovu se mísit s elektrony, zatímco neutrální radikály mají větší šanci zůstat v plazmě a prodloužit tak dobu své existence. I když ionty všeobecně příliš nepřispívají procesu vytváření povlaku, ty ionty, které dopadají na povrch substrátu v průběhu růstu povlaku výrazně ovlivňují jeho vlastnosti. Protože jsou molekuly plynu namísto tepelné energie aktivovány prostřednictvím energetických elektronů, dochází ke snížení teploty reakce. Teplota substrátu má i v PCVD procesu důležitou roli, protože aktivační energie chemické reakce je získávána především z doutnavého výboje. V průběhu růstu povlaku musí absorbované radikály difundovat do stabilních poloh, aby se staly součástí vznikajícího povlaku. Tento pohyb radikálů na povrchu substrátu je silně ovlivněn jeho teplotou. Při vyšší teplotě substrátu získají radikály více energie a snadněji difundují do stabilních poloh, čímž vytvářejí hutnější povlak, zatímco při nižší teplotě je difúze bržděna a povlak má více defektů a tím i nižší hustotu. Teplota substrátu ovlivňuje také stechiometrii povlaku [2].

Další metodou, která je založena na principu snížení vysokých pracovních teplot CVD metody je tzv. **MTCVD** metoda (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – CVD za středních teplot). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, kde teploty nanášení povlaků přesahují hodnoty 1000÷1040 °C, umožňuje technologie MTCVD nanášet povlaky z plynné 69 fáze za teplot podstatně nižších, 700÷850 °C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH₄ (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH₃CN, zdroj dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl₄) [2].

PŘÍLOHA 3

Rozdělení SK do 6 aplikačních skupin včetně podskupin.

Skupina	Podskupiny	Řezná rychlost, tvrdost	Posuv, houževnatost	Základní chemické složení	Aplikace
P	P01 -P50 (P(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká	WC (30-82)% + TiC (8-64)% + Co (5-17)% + (TaC.NbC).	SK pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku (nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatová ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
M	M01-M40 (M(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká	WC (79-84)% + TiC (5-10)% + TaC.NbC (4-7)% + Co (6-15)%	SK pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku (austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žárovevná, nemagnetická a otěruvzdorná ocel.
K	K01-K40 (K(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká	WC (87-92)%+ Co (4-12)% + (TaC.NbC)	SK pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobivou třísku (Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
N	N01-N30 (N(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká		SK pro obrábění neželezných materiálů (slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
S	S01-S30 (S(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká		SK pro obrábění (žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
H	H01-H30 (H(x +5))	Vysoká ↓ Nízká	Nízká ↑ Vysoká		SK pro obrábění (zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48-60, tvrzené kokilové litiny HSh 55-58.

PŘÍLOHA 4

Nikl

Používá se jako kovové pojivo u cermetů, které má zastoupit špatně dostupný kobalt. Nikl se v přírodě vyskytuje zejména ve formě oxidu ve směsi s železem (laterit a garnierit) nebo ve formě sulfidů (millerit (obr.4.1) – NiS , pentlandit – $(\text{NiFe})_9\text{S}_8$, nikelin NiAs).

Největším současně těženým nalezištěm niklových rud je kanadský Sudbury v provincii Ontario. Předpokládá se, že původem těchto rud je obrovský meteorický zásah Země v dávných geologických dobách. Další oblasti s bohatým výskytem niklových rud jsou např. Rusko, Nová Kaledonie, Austrálie, Kuba a Indonésie [2].

Jeden z nejznámějších způsobů výroby vysoce čistého práškového niklu je založen na procesu karbonylace, při kterém je vyráběn niklový karbonylový plyn. Tento plyn je vstřikován do speciální komory (stěny komory jsou ohřívány na teplotu asi $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) kde se rozkládá a přitom vytváří niklový prášek ve formě volně spojených vláken [2].



Obr. 4.1 Millerit[1].

PŘÍLOHA 5

Hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky:

- vysoká tuhost systému stroj-nástroj-obrobek (kmitání jakéhokoli druhu výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje),
- použití výkonných obráběcích strojů s širokým rozsahem posuvů a otáček (výhodná je zejména možnost jejich plynulé změny) a možností nastavení vysokých řezných rychlostí,
- výborný stav obráběcího stroje,
- zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku (zejména při soustružení větších součástí při vysokých otáčkách, kdy proti upínacím silám působí velké odstředivé síly),
- zakrytí pracovního prostoru obráběcího stroje (ochrana obsluhy před odlétávající třískou),
- odstranění kůry obráběného polotovaru (zejména u odlitků, výkovků, ale i válcovaného materiálu) jiným druhem nástrojového materiálu (např. slinutým karbidem, který má vyšší odolnost proti abrazivnímu mechanismu opotřebení, které převládá při obrábění kůry),
- srážení náběhových hran na obrobku,
- najíždění a vyjíždění z řezu při snížených hodnotách posuvu na otáčku (platí zejména pro pracovní posuvy $f > 0,3$ mm),
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky,
- správná volba tvaru ostří břitové destičky (velikost a sklon negativní fazetky na čele).

PŘÍLOHA 6

Výroba oxidu hlinitého

Výroba je dělena do 5 základních operací [30]:

- úprava bauxitové suroviny;
- loužení;
- filtrace;
- precipitace;
- kalcinace.

Při loužení v roztoku hydroxidu sodného přechází většina hliníku ze suroviny na rozpustný hlinitan sodný. Vyčištěný roztok hlinitanu sodného se ředí a po ochlazení na 50 až 70 °C několik dnů míchá v krystalizátorech spolu s velkým množstvím (až čtyřnásobek hmotnosti oxidu hlinitého v roztoku) recyklovaných jemných zrn gibbsitu - $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ve styku se zárodečnými krystaly s velkou plochou povrchu vykrystalizuje ve formě gibbsitu asi polovina hliníku z celkového množství, které roztok obsahuje. Zbýlý roztok se recykluje na loužení [2].

Gibbsit má vzhledem k dlouhodobému průběhu krystalizace tendenci vytvářet aglomeráty, v nichž je uzavřen mateřský roztok, a proto tímto způsobem vyrobený oxid hlinitý obsahuje několik desetin procent Na_2O . Takovýto Al_2O_3 není ještě vhodný pro výrobu oxidových keramik (lze z něj ale vyrábět čistý hliník) a proto musí být po promytí kalcinován v rotačních pecích. Zde se při teplotě asi 950 °C začíná vytvářet požadovaná α -modifikace Al_2O_3 a po asi hodinové výdrži na teplotě 1300 °C je konverze ukončena [2].

PŘÍLOHA 7 – 1/2

Výroba nitridu křemíku

- Přímá reakce prvků

Jedná se o endotermickou reakci tuhého nebo plynného křemíku s dusíkem, která vyžaduje velké množství energie. Vytváří se přitom velmi čistý Si_3N_4 ale pórovitý materiál (póry jsou nutné pro transport N_2), bez skelné fáze po hranicích zrn [2].

Upravený prášek křemíku se zrnitostí pod $25\mu\text{m}$ se kontinuálně nitriduje v průchozí peci s řízeným teplotním profilem. Vzhledem k exotermickému charakteru reakce, možnosti nukleace a krystalizace obou modifikací (α , β) a blízkosti teploty tavení křemíku (1410°C) je kvalita surového nitridu křemíku velmi závislá na parametrech nitridace (teplota, složení vsázky, tlak, složení nitridačního plynu). Při optimálních podmínkách je doba nitridace asi 8 hodin a surový produkt o specifickém povrchu asi $2\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ obsahuje kolem 90 hm.% α -nitridu křemíku, 5 hm.% elementárního křemíku a 1,5 hm.% kyslíku. Po vyprání produktu v roztocích koncentrovaných kyselin (HF , HCl) následuje intenzivní mletí [2].

- Karbtermická redukce a nitridace oxidu křemičitého

Směs křemenného písku a koksu je po dobu několika hodin ohřívána v proudu dusíku za normálního tlaku při teplotě $1450\text{--}1520^\circ\text{C}$. Při optimálních podmínkách syntézy lze získat Si_3N_4 , který obsahuje kolem 2 hm. % kyslíku a 1 hm. % uhlíku. Produkt je tvořen uniformními krystaly α -nitridu křemíku zrnitosti kolem $1\mu\text{m}$, které mají dobře vyvinuté krystalové plochy. Nad uvedenou horní hranici rozmezí teploty prudce narůstá podíl SiC [2].

Při zvýšeném tlaku dusíku se tvoření karbidu křemíku potlačí a nitrid křemíku vzniká i za vyšších teplot. Za těchto podmínek lze nitrid křemíku vyrobit i z karbidu křemíku [2].

Karbtermickou redukcí a nitridací oxidů jsou připravovány i sialony (Si-Al-O-N), které vznikají izomorfní substitucí jako tuhé roztoky se strukturou nitridu křemíku [2].

- Srážení plynné fáze

U této metody se jako východisková fáze používá buď chlorid křemičitý nebo silán, které reagují s amoniakem. Chlorid křemičitý je výhodný svojí nižší cenou, nevýhodou jeho použití je tvorba silně korozivních vedlejších produktů (HCl , NH_4Cl) [2].

Prášky vyrobené metodou srážení z plynné fáze (stejně jako metodou karbtermické redukce a nitridace SiO_2) mají větší obsah nečistot ve srovnání s práškem získaným nitridací křemíku při přímé reakci prvků. Tuto nevýhodu lze odstranit kalcinací, která současně způsobuje částečnou krystalizaci ve formě $\alpha\text{Si}_3\text{N}_4$ [2].

PŘÍLOHA 7 – 2/2

- Termický rozklad diimidu křemíku

Amonolýzou chloridu křemičitého vzniká tuhý polymerní diimid křemíku a současně se vylučuje málo rozpustný solvatovaný chlorid amonný [2].

Reakce, která se uskutečňuje v prostředí inertních organických rozpouštědel (toluen, dichlormetan, hexan apod.) nebo přímo v kapalném amoniaku při teplotách 0 až -70 °C, je silně exotermická a proto s ohledem na zachování izotermických podmínek vyžaduje intenzivní chlazení. Chlorid amonný lze od diimidu křemíku oddělit extrakcí kapalným amoniakem za normálního tlaku při teplotě varu amoniaku (-34 °C) nebo při vyšších teplotách a tlacích, kdy je extrakce účinnější vzhledem k tomu, že rozpustnost chloridu amonného s teplotou narůstá. Další možností je odsublímování chloridu amonného v proudu amoniaku nebo ve směsi amoniaku a dusíku při teplotách 900-1100 °C. Po odstranění chloridu amonného je meziprodukt amorfni, má vysoký specifický povrch (300-500 m² g⁻¹) a je velmi náchylný k hydrolýze vzdušní vlhkostí. Proto jeho další zpracování musí probíhat v ochranné atmosféře [2].

Termický rozklad vyčištěného diimidu křemíku probíhá přes řadu amorfniích meziproduktů a v průběhu žihání při 1200-1600 °C po dobu několika hodin krystalizuje α -nitrid křemíku, přičemž dochází ke snížení specifického povrchu na 20-4 m² g⁻¹ [2].

PŘÍLOHA 8

Typy nitridové keramiky

- **Reaktivně vázaný nitrid křemíku (RBSN- Reaction Bonded Silicon Nitride)**

Vyrábí se z křemíkového prášku přímou reakcí z dusíkem při teplotách 1200 až 1600 °C. V první operaci se vytvaruje kompaktní těleso z práškového křemíku (lisováním, litím, vstřikováním) a následuje nitridace. Proces nitridace je důležité řídit pečlivě, aby nedošlo k natavení křemíkových částic, a kvůli tomu může proces trvat až několik dní. V tomto typu nitridu křemíku se vyskytují dvě krystalografické formy. Převažující α - Si_3N_4 formě a menší β - Si_3N_4 formě. Póry, které byly obsaženy ve vylisovaném tělese jsou částečně zaplněny nitridovou fází (smrštění je v průběhu nitridace minimální).

Reaktivně vázaný nitrid křemíku je pórovitý, s hustotou menší než 85% teoretické hustoty, proto má výrobek řadu nepříznivých vlastností. I přes jeho nízkou hustotu má poměrně vysokou pevnost. Mezi výhody patří neomezený tvar výrobku a téměř žádné rozměrové změny při slinování.

- **Slinutý nitrid křemíku (Sintered Silicon Nitride)**

Je vyroben slinováním se zhutňujícími přísadami MgO. Dalšími možnými přísadami jsou oxidy Al_2O_3 a Y_2O_3 nebo jejich směsi. Slinování probíhá za teplot 1600-1800 °C v dusíkaté atmosféře o tlaku 1-10 Mpa. Proces zhutňování MgO je založen na vzniku tekuté fáze α - Si_3N_4 , která po ochlazení ztuhne na β - Si_3N_4 . Mezi zrný zůstane zachována skelná fáze.

Takto vytvořená materiál má vysokou hustotu, ale díky velkému množství výše uvedených přísadových fází se můžou zhoršit mechanické vlastnosti za vysokých teplot. Výhodou je beztlakové slinování (výroba výrobků neomezených tvarů).

- **Nitrid křemíku lisovaný za vysokých teplot (HPSN- Hot Pressed Silicon Nitride)**

Vyrábí se žárovým lisováním prášku nitridu křemíku v dusíkaté atmosféře o tlaku 15-50 MPa při teplotách 1550-1900 °C. Je zde využíváno zhutňujících přísad okolo 2-3 obj. % (MgO , Al_2O_3 a Y_2O_3).

Výraznou fází je zde β - Si_3N_4 produkující tělesa s nízkou pórovitostí a zároveň zvyšuje hustotu a mechanické vlastnosti takto vyrobeného materiálu. Naopak, vyšší obsah kapalné fáze zvyšuje křehkost a omezuje mechanické vlastnosti. Nevýhodou je omezený tvar výrobku, složitost výrobního zařízení a nutnost izolovat lisovaný materiál od stěn grafitové formy.

- **Nitrid křemíku vyrobený metodou HIP**

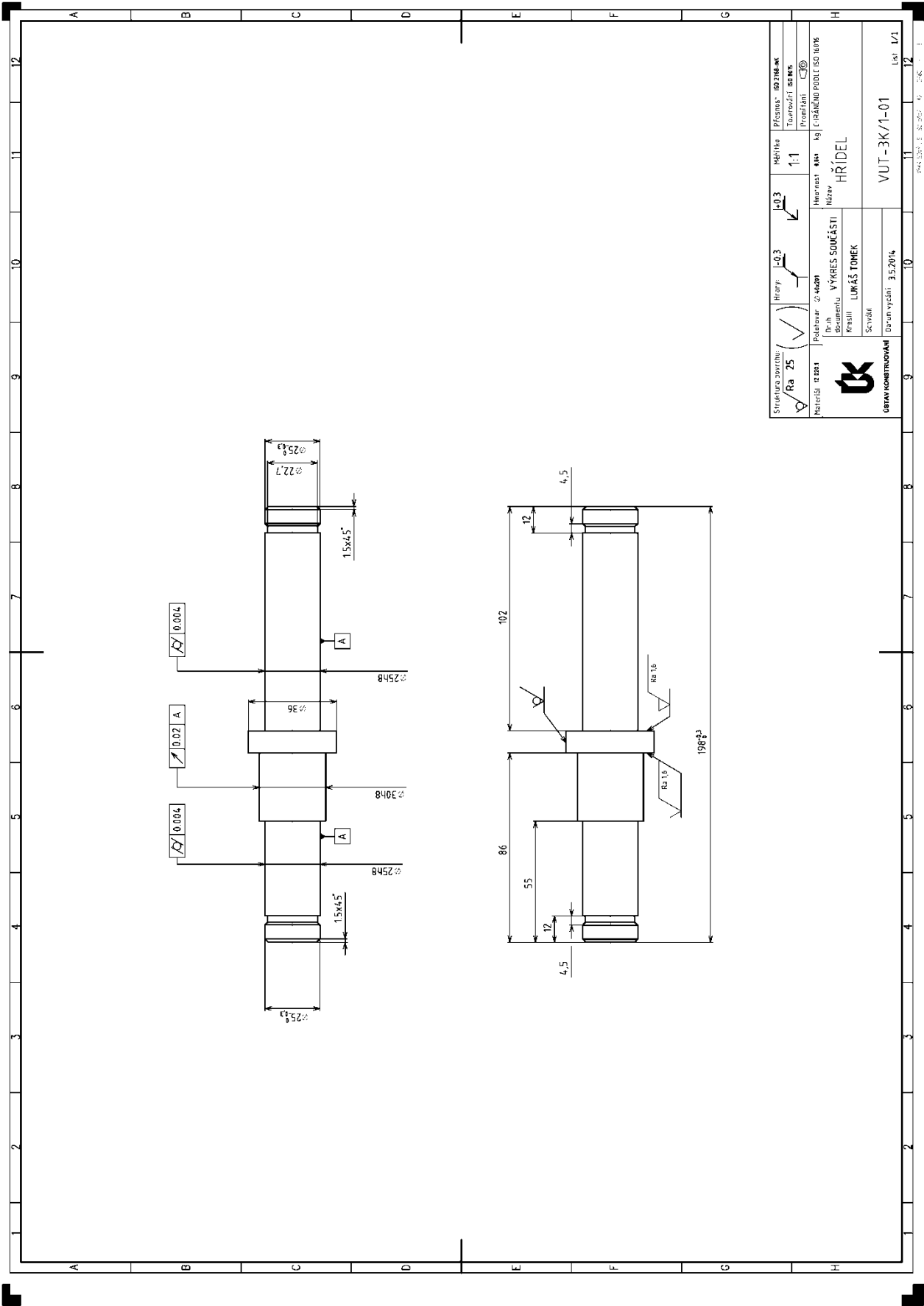
U této metody je slinované těleso vystaveno všestrannému tlaku až 200 MPa. Jako pracovní plyn je používán argon a dusík, který potlačuje tepelný rozklad materiálu při lisování bez pouzder.

Výchozí materiály mají otevřenou pórovitost, proto musí být umístěny v nepropustném pouzdře (sklo, skelné nebo keramické prášky) nebo ve vakuu, aby se zabránilo vniknutí plynu do pórů. Po ukončení procesu se obal odstraňuje chemicky nebo pískováním.

Metoda HIP je nejnáročnější metodou zhutňování, ale umožňuje nám vyrobit materiál o vysoké pevnosti s malým rozptylem hodnot mechanických vlastností [2].

PŘÍLOHA 9

Výkres hřídele.



PŘÍLOHA 10 – 1/2

Pracovní postup - rámcový

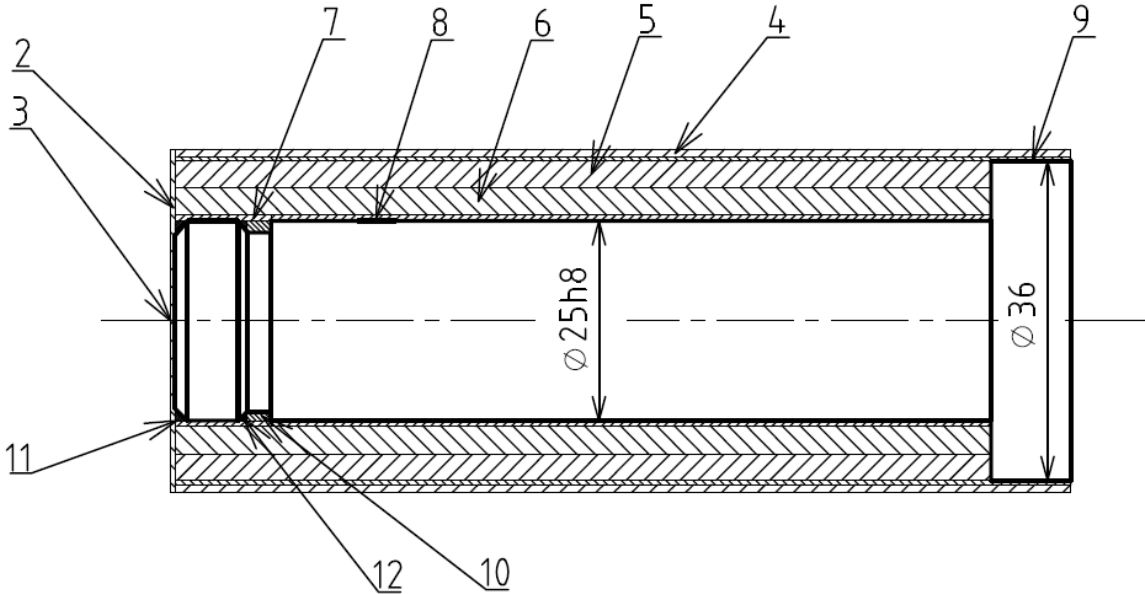
PRACOVNÍ POSTUP - RÁMCOVÝ			
Součást: HŘÍDEL		Číslo výkresu: VUT – 3K/1 - 01	
Materiál: 12 020.1		Polotovár: ϕ 40 – 6000 mm	Hmotnost: Hrubá: 2,291 kg Čistá: 0,841 kg
Č. op.	Název, ozn. stroje, pracoviště	Popis práce v operaci	Výrobní nástroje, přípravky, měřidla
1/1	Pásová pila Obrobna 54234	Řezat materiál na L = 201 mm	Posuvné měřítko 250 ČSN 25 1234
2/1	OPTI 280x700 Obrobna 25633	Upnout do sklíčidla, zarovnat čelo, navrtat středící důlek HRUBOVAT: ϕ 36 v délce l = 115 mm ϕ 25 – l = 102mm na 26,5 mm	T1, T5
		SOUSTRUŽIT: ϕ 36 v délce l = 115 mm ϕ 25 – l = 11 mm ϕ 25 – l = 102mm na 25,3 mm Zarovnat čelo na l = 102,05 mm	T2, T3
		Zápich ϕ 25 na l = 3 ±0,1 Srazit hrany na ϕ 25 – 1,5 x 45°	T3, T4
2/2	OPTI 280x700 Obrobna 25633	Otočit obrobek, upnout do sklíčidla, zarovnat čelo, navrtat středící důlek HRUBOVAT: ϕ 30 – l = 86 mm na 87,5 mm ϕ 25 – l = 55 mm na 26,5 mm	T1, T5
		SOUSTRUŽIT: ϕ 30 – l = 86 mm na 30,3 mm ϕ 25 – l = 11 mm ϕ 25 – l = 102mm na 25,3 mm Zarovnat čelo na l = 86,05 mm	T2, T3
		Zápich ϕ 25 na l = 3 ±0,1 Srazit hrany na ϕ 25 – 1,5 x 45°	T3, T4

PŘÍLOHA 10 – 2/2

Č. op.	Název, ozn. stroje, pracoviště	Popis práce v operaci	Výrobní nástroje, přípravky, měřidla
3/1	Pračka 02456	Odmastit obrobek	EBOL SIS 175 Chemotex
4/1	Obrobna/OTK 01456	KONTROLOVAT: 2x ϕ 25h8, ϕ 30h8 délka L = 198 \pm 0,1mm Četnost 20 %	Posuvné měřítko Mikrometr Koncové měrky
5/1	Bruska Hrotová BHE 047 NC/ 05862	Upnout obrobek mezi hroty BROUSIT : ϕ 30h8 na l= 31 \pm 0,1 mm 2x ϕ 25h8 na l= 43 \pm 0,1 mm l= 90 \pm 0,1 mm	Brousicí kotouč
6/1	Pračka 02456	Odmastit obrobek	Myčka LPW POWER JET 530
7/1	Brusírna/OTK 01456	KONTROLOVAT: ϕ 30h8 na l= 31 \pm 0,1 mm 2x ϕ 25h8 na l= 43 \pm 0,1 mm l= 90 \pm 0,1 mm Četnost 50 %	Třmenový kalibr 30h8, 25h8 Kontrolní měrky
8/1	Obrobna/OTK 01456	KONTROLOVAT: Všechny rozměry, drsnosti povrchů	3D měřicí stroj Bridge Type CMM LH 108
9/1	Balírna 03547	Konzervace, balení, uložení na palety	
10/1	Sklad 09984	Uskladnění palet	
Datum: 3.5.2014		Vyhotovil: Lukáš Tomek	Schválil:

PŘÍLOHA 11 – 1/3

Výrobní návodka

VUT FSI ÚST BRNO		VÝROBNÍ NÁVODKA				Pracoviště: Obrobna		
Součást: HŘÍDEL				Stroj: CNC SP 180				
Číslo výkresu: VUT – 3K/1 - 01				Číslo pracoviště: 25633		Číslo operace: 2/1		
								
Č.	Popis operace	v_c	n	f	a_p	L	t_{AS}	Nástroj
		$m \cdot min^{-1}$	min^{-1}	mm	mm	mm	min	
1	Upnout do sklíčidla	-	-	-	-	-	-	
2	Zarovnat čelo	275	2035	0,4	0,5	43	0,05283	T1
3	Navrtat středící důlek	13	1656	0,1	2,5	2,5	0,01510	T4
4	Hrubovat na ϕ 37 mm	165	1419	0,5	3	112	0,15786	T1
5	Hrubovat na ϕ 33,5 mm	165	1281	0,5	7,5	102	0,15925	T1
6	Hrubovat na ϕ 26,5 mm	165	1281	0,5	7	102	0,15925	T1
7	Soustružit ϕ 25±0,1 mm	300	3819	0,2	1,5	11	0,01440	T2

PŘÍLOHA 11 – 2/3

Č.	Popis operace	v_c	n	f	a_p	L	t_{AS}	Nástroj
		$m \cdot min^{-1}$	min^{-1}	mm	mm	mm	min	
8	Soustružit $\phi 25,3-0,1$ mm	300	3631	0,2	1,2	90	0,12393	T2
9	Soustružit $\phi 36 \pm 0,1$ mm	300	2653	0,2	1	10	0,01885	T2
10	Soustružit zápich D3 na $\phi 25$	100	1273	0,1	2,3	3	0,02357	T3
11	Srazit hranu na $\phi 25 - 1,5 \times 45^\circ$	145	1443	0,2	0,5	1	0,00347	T2
12	Srazit hranu na $\phi 25 - 1,5 \times 45^\circ$	145	1443	0,2	0,5	1	0,00347	T2
Σ							0,73198	
Datum: 3. 5. 2014		Vyhotožil: Lukáš Tomek			Schválil:			
VUT FSI ÚST BRNO		VÝROBNÍ NÁVODKA			Pracoviště: Obrobná			
Součást: HŘÍDEL			Stroj: CNC SP 180					
Číslo výkresu: VUT – 3K/1 - 01			Číslo pracoviště: 25633			Číslo operace: 2/2		

PŘÍLOHA 11 – 3/3

Č.	Popis operace	v_c	n	f	a_p	L	t_{AS}	Nástroj
		$m \cdot min^{-1}$	min^{-1}	mm	mm	mm	min	
1	Upnout do sklíčidla	-	-	-	-	-	-	
2	Zarovnat čelo	275	2035	0,4	1,5	43	0,05283	T1
3	Zarovnat čelo na $L = 198 \pm 0,1$ mm	305	1943	0,2	1	43	0,11065	T2
4	Navrtat středící důlek	13	1656	0,1	2,5	2,5	0,01510	T4
5	Hrubovat na $\phi 37,5$ mm	165	1667	0,5	6	86	0,10318	T1
6	Hrubovat na $\phi 31,5$ mm	165	1667	0,5	5,5	86	0,10318	T1
7	Hrubovat na $\phi 26,5$ mm	165	1281	0,5	5	55	0,08587	T1
8	Soustružit $\phi 25 \pm 0,1$ mm	300	3819	0,2	1,5	11	0,01440	T2
9	Soustružit $\phi 25,3 - 0,1$ mm	300	3631	0,2	1,2	43	0,05921	T2
10	Soustružit $\phi 30,3 - 0,1$ mm	300	2387	0,2	1,2	31	0,06494	T2
11	Soustružit zápich D3 na $\phi 25$	100	1273	0,1	2,3	3	0,02357	T3
12	Srazit hranu na $\phi 25 - 1,5 \times 45^\circ$	145	1443	0,2	0,5	1	0,00347	T2
13	Srazit hranu na $\phi 25 - 1,5 \times 45^\circ$	145	1443	0,2	0,5	1	0,00347	T2
Σ							0,6364	
Datum: 3. 5. 2014		Vyhotovil: Lukáš Tomek			Schválil:			

PŘÍLOHA 12

Nástrojový list

VUT FSI ÚST BRNO		NÁSTROJOVÝ LIST		DATUM VYDÁNÍ:	3.5.14
Vyhotožil: LUKÁŠ TOMEK		Stroj: KOVOSVIT MAS SP 180		Číslo výkresu součásti: VUT – 3K/1 - 01	Číslo listu: 1.
Pozice nástro- je	znázornění	název nástroje	výrobce	označení výrobce	materiál
		název držáku			
T1		VBD hrubovací	Pramet	CNMM 120408E-NR	6630
		držák nožový	Pramet	PCLNR 2020 K12	
T2		VBD dokončovací	Pramet	DNMG 150604E-F	6615
		držák nožový	Pramet	PDXNR 2020 K15	
T3		VBD zapichovací š. 3 mm	Pramet	LFUX 030802TN	6640
		držák zapichovací	Pramet	XLCFR 1612 H03	
T4		středící vrták A2,5 ČSN 22 1110			HSS

PŘÍLOHA 13

Vzorce použité při tvorbě návodky:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

kde: v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 D – průměr obrobku [mm],
 n – otáčky [min^{-1}].

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000}$$

kde: v_f – posuvová rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 f – posuv na otáčku [mm],
 n – otáčky [min^{-1}].

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

kde: n – otáčky [min^{-1}],
 v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 D – průměr obrobku (nástroje) [mm].

$$t_{AS} = \frac{L_p}{n \cdot f}$$

kde: t_{AS} – strojní čas [min],
 L_p – dráha nástroje [mm],
 n – otáčky [min^{-1}],
 f – posuv [mm].

$$L = l_n + l + l_p$$

kde: L – celková délka obráběné plochy [mm],
 l_n – délka náběhu [mm],
 l – délka obráběné plochy [mm],
 l_p – délka přeběhu [mm].

PŘÍLOHA 14

Strojní pásová pila Pegas 235x300 (SHI-LR-F).

Pila Pegas SHI-LR-F se uplatňuje zejména v malosériové výrobě. Umožňuje dělit velké množství druhů jakostních materiálů (nerez, nástrojové oceli) a to jak profilů, tak plných polotovarů. Jedná se o poloautomatickou pilu s hydraulickým ovládáním. Po zapnutí stroje se svěráky automaticky upnout materiál, která je dělen zvolenou rychlostí a chlazen emulzí. Po oddělení materiálu se pila sama zvedne a povolí svěrák. Obsluha posouvá materiál ručně.



PŘÍLOHA 15

Soustruh Optimum OPTI D280x700 G Vario



Technické parametry:

Parametry stroje		Elektrické připojení	
Výška hrotu [mm]	140	Připojení	230 V; 50 Hz; 750 W
Max. točný průměr [mm]	280	Třída krytí	IP 54
Vzdálenost hrotů [mm]	700	Rozměry	
Otáčky vřetene [min-1]	80-2500	Výška [mm]	520
Kužel vřetena	MK4	Délka [mm]	1380
Vrtání vřetena [mm]	26	Hloubka [mm]	700
Podélný posuv [mm/ot]	0,1 - 0,2 - 0,3	Hmotnost [kg]	180
Stoupání závitu, metrický závit [mm/ot]	0,2 - 3,5	Pracovní prostor	
Stoupání závitu, palcový závit [počet chodů závitu/palec]	8 - 56	Výška [mm]	2000
Podélný posuv [mm/ot]	0,1 - 0,2 - 0,3	Délka	2200
Stoupání závitu, metrický závit [mm/ot]	0,2 - 3,5	Hloubka	1900
Stoupání závitu, palcový závit [počet chodů závitu/palec]	8 - 56		

PŘÍLOHA 16

Číslicově řízený soustruh KOVOSVIT MAS SP 180



Základní vlastnosti:

- robustní základ stroje a lože dávají strojům vysokou tuhost,
- deformace mechanických částí strojů jsou verifikovány numerickými metodami výpočtu – FEM,
- vřetenové jednotky umožňují velký obráběcí výkon,
- synchronní vestavné vřetenové motory poskytují vysokou dynamiku funkcí vřetena a výkonnou rotační osu C,
- suporty lineárních os, pravý vřeteník nebo těleso koníka pojíždí po valivém vedení a dávají strojům vysokou přesnost polohování a interpolovaného pohybu os,
- tuhost tříosého provedení horního suportu zajišťuje řešení s virtuálním pohybem osy Y, který je složen interpolací reálných os X a Y' svírající úhel 30 stupňů,
- programovatelný pohyb tělesa koníka redukuje jinak nutné zásahy obsluhy do obráběcího procesu,
- absolutní odměřování lineárních os usnadňuje obsluhu stroje,
- stroje splňují vaše očekávání ve snadné obsluze včetně integrovaného dílenského programování.

PŘÍLOHA 17

Loga hlavních lídrů v oblasti výroby řezných nástrojů

